

分类号 TV641

密 级

单位代码 10618

学 号 1110A002



重庆交通大学

专业硕士学位论文

基于反射波成像的堤坝隐患 诊断技术研究

研究生姓名: 袁 鹏

导师姓名及职称: 赵明阶 教授

申请专业学位类别 工程硕士 学位授予单位 重庆交通大学


论文提交日期 2014 年 4 月 20 日

专业领域名称 水利工程 论文答辩日期 2014 年 5 月 29 日

2014 年 6 月

重庆交通大学学位论文原创性声明


本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。


学位论文作者签名：

日期：2014年6月5日

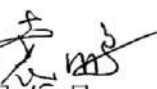
重庆交通大学学位论文版权使用授权书

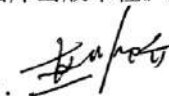
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名：
日期：2014年6月5日

指导教师签名：
日期：2014年6月5日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：
日期：2014年6月5日

指导教师签名：
日期：2014年6月5日

Research on Reflected Wave Tomography Method for Hazard Diagnosis of Dam

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Yuan Peng

Supervisor: Prof. Zhao Mingjie

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

摘 要

随着国家对于水利工程除险加固及病害整治的重视，堤坝隐患的诊断已经越来越迫切的需要出现更好的技术。在此背景之下，本文依托国家自然科学基金项目“基于三维波电场耦合全息成像的堤坝隐患诊断技术研究”，试图利用反射波这一特定波形对于堤坝隐患进行成像分析。分别就各向同性及横观各向同性两种介质类型对于堤坝隐患诊断技术进行研究：在各向同性的情况下，基于波速成像的原理开发出波速成像程序，通过建立数值计算模型来验证成像程序的准确性，并对其进行误差分析；在横观各向同性情况下，利用反射波程序对于堤坝隐患进行正演模拟研究。

本文的主要工作如下：

（1）对于堤坝的隐患进行类型和成因分析，主要包括坝基隐患及坝体隐患，分析了含渗漏通道、含不密实区域两种类型。通过对于土介质和土石复合介质两种堤坝介质类型来对于堤坝的波动传播特性进行了研究。结合工程实际，基于均质和心墙两种坝型提出了堤坝隐患的概化模型；

（2）根据惠更斯原理、斯奈尔定律、费马原理、互易原理及 Radon 变换，改进后的最短路径射线追踪算法等正演理论，结合最小二乘正交分解法求解线性方程组的反演理论，利用反射波建立了各向同性介质堤坝隐患诊断的正、反演理论计算模型，并给出了程序编制及实现的具体过程；

（3）利用所编程序对于均质和心墙两种坝型在（不含隐患、含渗漏通道、含不密实区域）三种条件下进行数值模型计算，分析反演图像与理论模型的差异，通过均质坝与心墙坝的对比、同种坝型内部不同隐患的对比、剖面与立面之间的对比、走时差异的对比，来对正、反演模型的可行性及可靠性进行验证；

（4）利用反射波基于射线追踪原理及各向异性的波动理论对于横观各向同性介质堤坝隐患进行正演分析，对于各向异性介质的弹性波动方程，横观各向同性介质的 Thomsen 参数表征进行分析。结合各向异性特征，利用非线性反演和联合反演两种方法对于横观各向同性介质下的反演进行分析；

（5）利用基于横观各向同性介质下的反射波成像技术建立理论模型进行计算，分别从同种波形在不同入射角度情况下、不同波形在同种入射角对于堤坝（均质坝、心墙坝）隐患进行了正演分析。

关键词：堤坝隐患，概化模型，反射波，堤坝介质，成像技术

ABSTRACT

With the nation paying more attention to reinforcement and diseases harnessing of Hydraulic Engineering, the diagnosis of dam hidden defectiveness is more and more urgent needed to be updated with better technology. Under this background, this article attempted to use the reflection wave imaging and analyzing for dam hidden defectiveness. This master graduate dissertation relies on the project of National Natural Science Foundation of China (NSFC)-The research of diagnosis technology in view of Dam hidden trouble based on the three-dimensional wave to electric field coupling by the holographic imaging .The research is from two sides: the isotropic and transverse isotropic in this master graduate dissertation.

We have developed the wave velocity imaging software which based on the theory of wave velocity imaging, meanwhile we also have built mathematical model which is in order to verify the accuracy of the imaging software and carry on the error analysis, in the case of isotropic. The reflection wave procedure is used for studying dam hidden defectiveness in forward modeling, when the dam medium is transverse isotropic.

In this dissertation, the main works are as follows:

(1)Analyzed the types and the causes when dam hidden defectiveness analysis. It mainly includes the dam foundation hidden defectiveness and the dam body hidden defectiveness. The hidden defectiveness includes two types which are seepage channel and Imperfect areas. The research of wave propagation characteristics is from two aspects separately. The one is the soil medium and the other is earth-stone composite medium. Then, putting forward the dam hidden defectiveness of generalized model and combining with the engineering practice from two types of dams which are homogeneous and core wall.

(2)Established the forward and inversion theory calculation model with respect to the dam hidden defectiveness of isotropic dams medium by using the reflection wave. The programming and its implementation process are given in this article. The forward theories in this programming are Huygens Principle, Snells law, Fermat's principle, reciprocity principle, radon transform, the improved shortest path ray tracing algorithm and so on. They are combine with the Least-squares orthogonal decomposition method to solve linear equations inversion theory constitute the theoretical foundation of this entire article.

(3) Built numerical calculation for homogeneous dam and core wall dam by using the program under the conditions of no defectiveness, seepage channel and imperfect area. Then we verify the feasibility and reliability of the forward model and inversion model by analyzing the differences between the inversion image and the theoretical model, comparing channel homogeneous dam with channel core wall dam, comparing different hidden defectiveness in the same type of dam, contrasting between the section and elevation in the same hidden defectiveness, also the difference travel time between kinds of hidden defectiveness.

(4) Made forward analysis for hidden defectiveness in transversely isotropic dams medium based on Ray tracing principle and the wave theory of anisotropy by using reflection wave. We also analysis the elastic wave equation of anisotropic medium and the Thomsen parameter characterization of transversely isotropic medium. Then we used two types of methods which are nonlinear inversion and joint inversion for inverse analysis in transversely isotropic media.

(5) Established forward theoretical model to calculate. We have based on the reflection wave imaging technology under the transversely isotropic media. We also carried out the dams forward calculation analysis on hidden defectiveness under the conditions that are the same waveform at different incident angles and the different waveform in the same incidence angle in homogeneous dams and core wall dam.

KEY WORDS: dam hidden defectiveness, generalized model, reflected wave, dams medium, imaging techniques

目 录

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出及意义	1
1.2 堤坝隐患诊断的研究现状及趋势	1
1.3 地震层析成像发展现状及趋势	4
1.3.1 各向同性介质波速成像研究现状	4
1.3.2 各向异性介质波速成像研究现状	5
1.4 本文的主要研究内容与技术路线	7
1.4.1 本文的主要研究内容	7
1.4.2 本文研究的技术路线	7
第二章 堤坝介质波动特性及隐患的概化模型研究	9
2.1 堤坝及其隐患的常见类型分析	9
2.1.1 堤坝的常见类型分析	9
2.1.2 堤坝隐患的常见类型分析	9
2.2 堤坝介质的波动传播特性	11
2.2.1 堤坝介质中土介质的波动传播特性	11
2.2.2 堤坝土石复合介质的波动传播特性	11
2.3 堤坝隐患的概化模型	19
2.3.1 均质堤坝的隐患概化模型	19
2.3.2 心墙坝的隐患概化模型	21
2.4 本章小结	22
第三章 堤坝介质反射波成像的正演方法分析	23
3.1 各向同性介质反射波正演理论	23
3.1.1 基本原理	23
3.1.2 反射波成像基本方程	25
3.2 各向异性介质反射波正演理论	26
3.2.1 堤坝介质的波动理论分析	26

3.2.2 各向异性介质的分类	28
3.2.3 各向异性介质的 Christoffel 方程	30
3.2.4 横观各向同性介质的 Thomsen 参数表征	31
3.2.5 Thomsen 参数表征的介质理论分析	33
3.3 改进后的最短路径算法	37
3.3.1 最短路径算法	37
3.3.2 改进后的最短路径算法	37
3.4 反射波的模拟	38
3.4.1 模型参数化及速度界面离散化	38
3.4.2 射线追踪	40
3.5 本章小结	40
第四章 堤坝反射波成像反演分析及软件编制与实现	41
4.1 各向同性介质反射波反演方法	41
4.1.1 线性方程组的求解	41
4.1.2 最小二乘正交分解法(LSQR)	41
4.1.3 迭代收敛准则	45
4.2 TI 介质反射波反演方法	45
4.2.1 非线性反演方法	45
4.2.2 联合反演方法	47
4.3 各向同性下的反射波软件编制及实现	47
4.3.1 正演模拟程序的编制及实现	47
4.3.2 反演计算程序的编制及实现	49
4.4 TI 介质下的反射波软件编制及实现	50
4.4.1 射线追踪的实现	50
4.4.2 正演计算程序的编制及实现	51
4.5 本章小结	53
第五章 均质模型数值模拟研究	54
5.1 均质坝	54

5.1.1 不含隐患均质坝	54
5.1.2 含渗漏通道均质坝	55
5.1.3 含不密实区域均质坝	58
5.2 心墙坝	60
5.2.1 不含隐患心墙坝	60
5.2.2 含渗漏通道心墙坝	62
5.2.3 含不密实区域心墙坝	65
5.3 误差分析	68
5.3.1 含渗漏通道均质坝走时误差分析	68
5.3.2 含不密实区域均质坝走时误差分析	69
5.3.3 含渗漏通道心墙坝走时误差分析	69
5.3.4 含不密实区域心墙坝走时误差分析	70
5.4 结果讨论	71
5.4.1 均质坝与心墙坝成像的对比分析	71
5.4.2 同种坝型不同隐患对比分析	71
5.4.3 影响因素分析	72
5.5 本章小结	72
第六章 TI 介质模型数值模拟实现	73
6.1 均质坝	73
6.1.1 含渗漏通道均质坝	73
6.1.2 含不密实区域均质坝	79
6.2 心墙坝	85
6.2.1 含渗漏通道心墙坝	85
6.2.2 含不密实区域心墙坝	87
6.3 TI 介质与各向同性介质走时差异分析	89
6.3.1 P 波下的不同介质走时差异	89
6.3.2 SV 波下的不同介质走时差异	90
6.3.3 两种波形走时差异分析	90
6.4 多发多收数值模拟	91

6.5 本章小结.....	92
第七章 结论与建议.....	94
7.1 研究成果及相关结论.....	94
7.2 本文的创新点.....	94
7.3 下一步工作建议.....	95
致 谢	96
参考文献	97
攻读硕士学位期间发表论文及参与科研情况	101

第一章 绪论

1.1 问题的提出及意义

目前我国已建成各种大中小型水库共 85160 座，总库容达 5624 亿立方米，已修建江河堤防长约 27.7 万多公里，已建海堤长约 1.4 万余公里，上述这些水利工程对于防洪、灌溉、供水、发电等方面发挥着重大的作用，带来了巨大的经济效益。然而在对于这些工程资料的排查中发现，其中的大部分均建于解放后的二十年左右，由于当时的技术水平及施工条件的不足，导致了大量的三边工程，其设计标准低、建设质量差，随着时间的推移很多问题开始出现，病险情况相当严重。2011 年水利部开始实施新一轮的《全国重点小型病险水库除险加固规划》，并同时实施《全国大中型病险水闸除险加固规划》。参照上述规划，需要在“十二五”期间内完成 5000 多条中小河流重点河段的治理，其中包括项目 8000 多个，河道长度 6 万多公里。全面完成 5400 座重点小（1）型水库、1.59 万座重点小（2）型水库、2.5 万座一般小（2）型水库的除险加固。上述现状表明，国家高度重视水利工程的除险加固和病害治理。然而对于水库堤坝病害进行处治的关键技术问题是如何准确诊断堤坝的病害位置和类型。否则，加固将是无的放矢，不但会造成建设资金的浪费，也不符合我国建设节约型社会的理念。因此开展水利工程堤坝隐患的诊断与探测技术的研究不仅具有重要的现实意义，而且也是国家实现可持续发展的必然要求。

目前在混凝土大坝中有较多的检测手段和方法，如直接取芯样的破损检测、间接分析的拉拔、贯入阻力、回弹、超声回弹、核子法、超声波法、混凝土取芯法等技术。然而对于大多数土石堤坝，由于坝体存在结构类型的多样性，材料的非均质、非线性和不连续性、本构关系的不确定性以及各向异性，荷载类型、组合以及施工方式等的多样性和随机性，大坝施工、扩建、加固、运行、管理以及环境对结构和材料参数影响的复杂性等，使土石堤坝的病害诊断比混凝土坝更加复杂。特别是土石复合介质中水渗流规律复杂，其渗透路径往往受到坝体本身的压实度、土石比、坝体均匀性等多种因素的影响，使得混凝土坝体采用的诊断技术在土石坝中难以应用。因此通过研究土石堤坝的渗漏规律，开发具有针对性的先进诊断技术已经成为当前病险土石堤坝水库加固中亟待解决的关键技术问题。

1.2 堤坝隐患诊断的研究现状及趋势

回望历史，我国在堤坝隐患检测技术上的探索一直在延续，最早开始于 1974 年，此时山东水科院基于电阻率法对于堤防隐患处的灌浆效果进行了相应的评估，

并开展了相应的堤坝病害检测工作，最终于 1985 年提出了一套基于高密度电法的物探探测系统。到 1991 年，河海大学联合江苏省农科院等单位基于“坝基渗流场探测中多含水层稳定流混合井流理论与综合示踪法研究”项目对于坝基及坝体内部的渗漏隐患进行了大量的物理模型试验研究。1992 年开始，基于国家“八五计划重点科技攻关项目堤防隐患探测技术研究”黄河水利委员会等单位开始利用各种探测手段进行试验研究，最终的成果则被纳入国家九五计划重点科技项目，他们采用的探测手段包括：电阻率探测法、高密度电阻率法、电阻率剖面法、瞬态瑞雷波法、浅层地震反射法、瞬变电磁法、天然电磁场选频法、探地雷达法等方法。1996 年，我国陆续开始了对于探地雷达技术应用到水利工程建设中的相关研究，同时底青云等人首次在堤防隐患检测中采用了高密度直流电阻率法。1988 年我国经受了百年一遇的大洪水，于是水利部的 988 科学计划把堤坝隐患检测相关课题列为了首要任务，并组织相关的一些科研单位及院校进行研究，此时地球物理勘探方法成为了无损检测手段的首选，山东黄河河务局开发的智能堤坝隐患检测设备在同年的堤防隐患检测中起到了很大的作用，受到了广大好评，第二年在此基础上又将探测仪器的开发列为了水利部重大科技项目，同时国家防汛抗旱指挥部先后在北京大兴及湖南益阳建立了开发仪器所需的试验场，并在现场召开了评议会。世纪之交，在郑州召开了由国家防汛抗旱指挥部办公室等单位组织的“全国堤坝隐患及渗漏探测技术研讨会”。2002 年，国家防总主持并组织一些单位对于《堤防隐患探测技术规程》进行编制，希望借此来规范我国堤防探测领域的工作。上述研究及进展对于我国的堤坝隐患诊断技术的发展和进步起到了很大的推动作用，随着研究的不断深入，在近 10 多年来我国开发并应用了高密度电阻率法、瑞雷波法、浅层地震法、探地雷达法、电磁测深法、瞬变电磁法，以及微波遥感、地层测温、红外测温等等技术。通过实践表明，高密度电阻率法、浅层地震法和探地雷达法是目前相对较成熟和可靠的堤坝隐患探测技术，但他们也都存在不同程度的问题和缺陷。

高密度电阻率法与测深法、常规电阻率剖面法相对比的优点在于：能够提供某一深度的探测地质体在沿着水平方向的电性的相关变化趋势，能够反映地质体沿着不同深度的电性变化情况，结合水平及竖向优点可以从二维水平上对于探测地质体的相关电性畸形特征进行一定的反映。但是该方法在理解与应用方面，还存在着不少的问题。如随着深度的增加探测分辨率急剧降低、由于接地条件很差导致图形中形成一些“假异常”面、观测方式对数据成果的影响较大等等，更重要的问题是高密度电阻率法对含水量甚为敏感，但在反映密度程度方面，多解性极其明显，从而造成解译难度增大。

雷达法检测技术主要以微波作为媒介来传递信息，然后再根据所得信息依据

其传播特性来对材料内部的结构和产品的性质及缺陷进行相关的分析检测。由于它能够穿透大体积混凝土，可测深度较大，在对道路、桥梁、隧道、建筑物等各种结构物进行无损探测时，通过对混凝土结构内的密实情况、空洞、裂缝、钢筋分布、保护层厚度的探测，为这些结构物的诊断和治理提供依据，取得了很好的效果。

浅层地震法^[1-2]主要由浅层地震的反射波及折射波组成。前者是目前较为成熟的一种勘探方法之一，主要是利用不同介质具有不同的波阻抗原理进行探测，在界面处就会产生波的反射，利用所接收的反射波参数从而分析出介质的分布状态及相关的物性参数；后者也同样是地球物理勘探中的一种重要手段，其主要原理是利用介质是具有波速差异这一特性来对于地质体进行探测，二者均可以对地质体进行相应的探测，此方法同样应用于堤坝隐患的检测上。浅层地震反射法不仅可以适用于寻找地质构造、勘探基岩面、分析岩土物性参数，亦可用于寻找地下溶洞及地质异常体。浅层折射波法则常被利用来进行覆盖层厚度、断层、基岩起伏、古河道分布等工程及水文地质问题。随着基础设施建设的加速扩展，相应的地质问题越来越成为制约发展的因素之一，不良的地质条件危害着老百姓的安全，于是浅层地震法有了其用武之地。

在过去的几十年中，已经进行了很多基于堤坝内部隐患的研究，研究的较多的主要是渗漏方面，主要的研究参数之一即为温度，水的温度可以成为天然的示踪剂，当堤坝内部存在渗漏通道时，就可通过水渗漏下导致的堤坝局部不规则温度场来进行量测，测量其温度的偏差，从而定位出渗漏通道并定性的判断渗漏速度。然而此方法亦存在一定的局限性，主要体现在季节性变化影响较大，需要随时的参照外界天气情况，且常规的点式监测法所得信息量较小，对于渗漏区的信息捕捉有一定的难度。于是在此基础上发展了一种基于温度场的电热脉冲法分布式光纤温度测量系统，其克服了上述所说的局限性从而实现对于坝体渗漏的监测，如需要对于渗漏区的细粒土冲蚀情况进行检查，就可以结合核子密度测量技术对于土体密度的变化进行测量。但这些方法主要是针对大坝处于安全状态的一种监测行为。而对于大坝已经出现了渗漏等病害，需要追踪其渗漏路径和分布范围时，就不再适用。

为了给土石坝渗漏处治提供科学依据，目前在工程中除了采用钻探、物探等常规手段外，已有一些学者从事电阻率影像技术在渗漏检测中的应用研究，但由于单纯采用电阻率单一参数，加之堤坝的特殊结构使得对观测结果解释难度增加，特别是当渗漏通道电阻率介于粘土和填土之间时，渗漏不易探测，直接二维反演效果不佳。当视电阻率图像中无明显异常时，需进一步对数据进行三维堤坝(土石坝为主)改正，然后再进行二维反演解释，但这种解释方法使得检测精度得不到提

高。对于常规的钻探和物探方法更是难以达到理想的效果，主要是由于钻探具有盲目性，而物探具有多解性。

随着科学技术的发展，CT成像诊断技术在各个领域得到广泛应用，在水电工程中已经被用于坝基探测、灌浆效果评价以及混凝土损伤识别等方面。本文主要对于反射波探测堤坝隐患进行研究，目的在于拓展探测的方法，找到一种更好更适合隐患诊断的技术，从而为实现综合物探打下基础。

1.3 地震层析成像发展现状及趋势

地震波的传播主要与介质因素有关，本文根据工程实际情况拟把所要研究介质分为两类来分析：各向同性介质和各向异性介质。

1.3.1 各向同性介质波速成像研究现状

各向同性介质亦属于各向异性介质中的一种，只是在本构关系的处理中理想化的把弹性刚度矩阵简化为只与两个弹性参数（拉梅常数）有关的方程。

地震层析成像技术（CT 成像）是通过对物体外部进行非线性破坏探测，获得地震波各种震相的运动学和动力学相关信息。地震层析成像最早始于 1971 年，此时 Bois 等人利用了地震波在地质体内部的旅行时推测出了两条井之间的构造边界，1975 年，地震学家开始研究地球构造体的内部成像问题^[3-6]，主要包括大数据量、不确定性因素、解的不唯一性、多种数据误差。1977 年，Aki 跨学科的把层析成像技术应用于地震勘探学中，并在理论研究及地震勘探中取得了很多重要的成果，同时利用此技术对于岩石圈的三维构造进行了地震层析成像^[7]。

近年来，国际上将地震层析成像技术应用于地球内部的孕震机制、火山活动、板块动力学、地幔柱、洋中脊、地幔流等研究当中，获得了很多重要的研究成果。

射线理论及方法是研究地震波的重要方法之一，射线理论也经常用于非均匀介质和复杂构造条件下的地震传播问题^[8]，利用旅行走时信息进行正演模型最常用的为射线追踪，而且应用的比较普遍。射线追踪方法可分为传统射线追踪方法和基于网格单元扩展的方法。

传统的射线追踪方法分为试射法和弯曲法。试射法亦称打靶法，是根据 Snell 定律从反射点不断的修改初始入射参数，最后找到一条最适合路线，该法的实质为求解边值问题。初值问题、近轴射线理论、非线性打靶算法^[9-11]均属其范畴。弯曲法则是一种不断的调整发射点与接收点直接路径直到模拟出真实路径的一种方法，可为伪弯曲或弯曲算法，其区别在于伪弯曲是由线性插值点来表示，而弯曲法则通过求解射线方程得到射线路径^[12]。

基于网格单元扩展方法有着稳健、全局解、精度高、计算耗时少等优点。目

前应用较为广泛的包括：有限差分解程函方法、最短路径算法、线性旅行时插值算法^[13-15]，主要介绍最短路径算法。

最短路径算法最早是由 Nakanishi 提出，主要是把网格节点连线视为射线路径^[16]。自此之后很多学者提出了很多改进算法，刘洪提出界面网格全局算法^[17]，赵爱华提出非均匀介质中的射线追踪快速算法、双重网格法^[18-20]，王童奎提出 PS 转换波追踪的界面二次源算法^[21]，白超英等提出了三维改进型最短路径算法^[22-25]并广泛应用。地震层析成像反演的方法可以分为 2 类，第一类是基于算子的线性反演方法，包括奇异值分解法、共轭梯度法、最小二乘法和阻尼最小二乘法等；另一类是基于模型的完全非线性反演方法，包括遗传算法、模拟退火法和神经网络法等^[26-28]。基于算子的线性反演方法最早的为（ART）代数重建技术，这是一类根据射线依次修改相关象元的图像向量的迭代方法，其优点为计算速度快，缺点是迭代收敛性相对较差，同时对于初值的选择有一定的依赖性。其后，联合迭代重建技术开始兴起，它与代数重建技术算法不同，联合迭代技术弥补了代数重建技术收敛性差的问题，主要原理是在某轮迭代中，这轮的所有象元的图像向量函数平均值均采用前一轮的所得值的近视值来进行修改，区别于代数重建法的逐条射线修改原理，缺点是内存消耗较大。随着科学家对于前人成果的不段改进，1982 年 Saundes 和 Paige 共同提出了最小二乘正交分解法（LSQR），此方法是基于 Lanczos 原理求解最小二乘问题的一种常规投影方法^[29-34]。此方法不仅弥补了代数重建技术收敛性差的特点，而且克服了联合迭代重建技术内存消耗较大的特点。在 2001 年，常旭等利用相关分析给出了 LSQR 解的定量评价，认为最小二乘正交分解法是一种比较可靠的线性反演方法。与此同时在层析成像技术中，非线性反演方法同样得到了很多的研究，如张元生等人将模拟退火法和遗传算法应用到了层析成像技术中，裴正林等人在随机优化过程中引入了小波多尺度分析思想，同时把遗传算法和多尺度反演方法相结合，进而提出了多尺度逼近的相关遗传算法^[35]。

1.3.2 各向异性介质波速成像研究现状

各向异性介质的研究在上世纪五十年代就开始了。Kelvin 提出了弹性张量无坐标表示法，并发表了史上第一篇关于各向异性弹性参数的文章；Kraut 通过研究格林函数，给出了各向异性波场的一些定解；Christoffel 发表了一本关于各向异性弹性波理论的专著，为各向异性理论的广泛使用打下了基础^[36]；之后 Rudzki、Love、Bruggeman、Rignichenko、Stoneley 等对于地震各向异性都做了很多深入的研究。到了二十世纪五十年代时，各向异性研究已经取得了较大的发展。Krey 和 Helbig 对于各向异性介质中的反射波的传播特性进行了研究，并利用了已有的地

震资料对于横纵向地震波传播速度不一致进行了解释^[37]；Hess 首次对实际观测资料进行了各向异性研究，第一次把各向异性研究应用于实际资料的处理当中^[38]；Hudson 进一步的完善了弹性本构方程，建立了薄裂隙理论^[39]；Crampin 提出了广泛扩容各向异性模型的概念，指出应力的作用是各向异性特征特性在地震波中传播的特征的原因^[40]；自二十世纪八十年代后各向异性的研究发展迅猛时期，研究进入细化阶段。Thomsen 根据本构方程中的弹性刚度矩阵提出了一套 Thomsen 各向异性参数，并由此分析了具有弱各向异性的 VTI 介质波动传播特性，推导出了目前应用较为广泛的正常时差公式^[41]；而对于国内的各向异性研究则兴起于近十多年，且开始成为了热门，自 1994 年开始，滕吉文、张中杰、张秉铭等^[42-47]在各向异性的波动理论研究、有限差分正演、偏移及各向异性与深部构造作用等方面度进行了很多实质且有意义的工作；到了 2000 年以后，研究各向异性的学者越来越多。邓怀群^[48]实现了横观各向同性介质中的正演模拟；姚陈^[49-50]等把模型推广到了 ATI 介质，得到了同类反射波的非双曲线时距方程；蒋先勇^[51]等研究了 VTI 介质中 P 波非双曲线速度分析；赵爱华^[52]等利用最短路径算法模拟了横观各向同性介质中的地震波走时计算；张铁强^[53]等将地震属性用于对实际资料的处理中，指明通过各向异性属性的应用，提高了剖面成像的质量和地震解释的精度；李建国^[54]等实现了 VTI 介质的 VSP 射线追踪模拟。白海军^[55]等基于波前构建法的 TTI 介质射线追踪进行了表述；李勤^[56]对于 VTI 介质进行了多波射线追踪及各向异性参数的分析；李勇博^[57]对于 VTI 介质及复杂模型的 FMM 射线追踪方法进行了研究；

各向异性介质的正演模拟方法较少且其算法均存在一定的问题，目前使用较多的为波动方程正演模拟及利用程函方程采用射线追踪来进行正演模型。波动方程法进行正演模拟具有波场信息丰富、波场齐全等优点^[58]，但其计算效率低且会产生干扰波，其丰富的波场信息也不利于单波的提取，容易干扰各向异性参数的分析。射线追踪法则有显示直观、计算效率高等相关优点，国内外众多学者对于各向异性介质的射线追踪进行了一系列的研究。张钊、李幼铭、刘洪^[59]对于射线追踪方法的相关发展现状进行了总结，对于国内外的相关研究资料进行了整理，介绍并分析了国内外近十几年来的射线追踪技术的发展趋势及目标；何樵登^[60]等对于均匀的横观各向同性介质中的 SV 波及 P 波进行了相应的研究，同时分析出了横波、纵波与各向异性参数的关系；张建中^[61]利用正演计算了三维 TI 介质的波场走时及 NMO 速度；唐巍、李磊^[62]则计算了多次 VTI 介质内波场多次波和首波的走时；孙福林^[63]则基于扰动理论推导了 P 波的一阶射线追踪方程并由此方程计算出了弱各向异性介质中弯曲界面的 P 波传播路径及走时；郝奇^[64]则对于 VTI 介质引入了梯形块状建模的思想，并由此推导了在倾斜界面下的 VTI 介质的 Snell 定律

公式，最后给出了实现反射波射线追踪的方法；国内外已经有越来越多的人投入到了这项领域的研究，他们在射线追踪技术的改进，复杂介质的射线追踪，算法的适应性、稳定性、精度及效率等方面均在做着很多有意义的研究。

1.4 本文的主要研究内容与技术路线

随着国家对于水利事业的重视，堤坝隐患的诊断技术的研究已经越来越多，本文本着拓展探测手段与方法的思路，依托于国家自然科学基金面上项目(51279219)“基于三维波电场耦合全息成像的堤坝隐患诊断技术研究”，围绕最短路径射线追踪正演技术手段，从各向同性介质及横观各向同性介质两个与堤坝内部结构相符的方面来对于其隐患进行相应的研究。建立各向同性正反演数值模型，分析均质坝与心墙坝的隐患及其波场特征；对于横观各向同性介质进行正演模型，分别就不同坝型的不同隐患进行分析，比较两者不同介质模型下的走时差异。

1.4.1 本文的主要研究内容

(1) 分析堤坝介质及其内部隐患的常见类型，提出基于均质堤坝与心墙坝隐患的概化模型，为数值模拟研究打下基础，研究堤坝介质的波动传播特性，分别就土介质与土石复合介质两方面进行研究；

(2) 分别从各向同性介质与横观各向同性介质两方面来对于堤坝介质的反射波成像正演方法进行分析，在各向同性介质下主要介绍其基本原理与反射波成像基本方程，在横观各向同性介质下主要介绍各向异性介质的分类、Thomsen 参数表征及介质理论分析。了解并分析核心算法最短路径射线追踪理论，进行反射波的模拟，如模型参数化及速度界面的离散化；

(3) 分别从各向同性及横观各向同性两种介质类型对堤坝反射波成像反演进行分析，分析其原理、方法及具体的实现过程。研究基于最小二乘正交分解法求解线性方程组的步骤，给出迭代收敛准则，探讨 TI 介质下的非线性反演方法及联合反演方法。给出基于各向同性与 TI 介质下的反射波成像程序具体编制及实现过程；

(4) 基于前述研究的堤坝介质反射波正反演原理、方法编制的程序来对于堤坝隐患进行数值模拟分析，在各向同性介质下建立正反演计算模型，对比分析理论模型与反演模拟的差异。在横观各向同性介质下建立正演射线追踪，分析在横观各向同性介质下的堤坝内部隐患的走时及射线路径，为更好的反演堤坝内部隐患提供更好的理论基础。

1.4.2 本文研究的技术路线

本文围绕堤坝隐患这一现实问题，从堤坝介质入手分析其波动特性。基于地球物理勘探中的地震层析成像分析堤坝介质反射波成像的基本原理及方法，对于堤坝隐患进行数值模拟研究，为堤坝隐患的检测提供一种更好的手段。技术路线图如图 1.1。

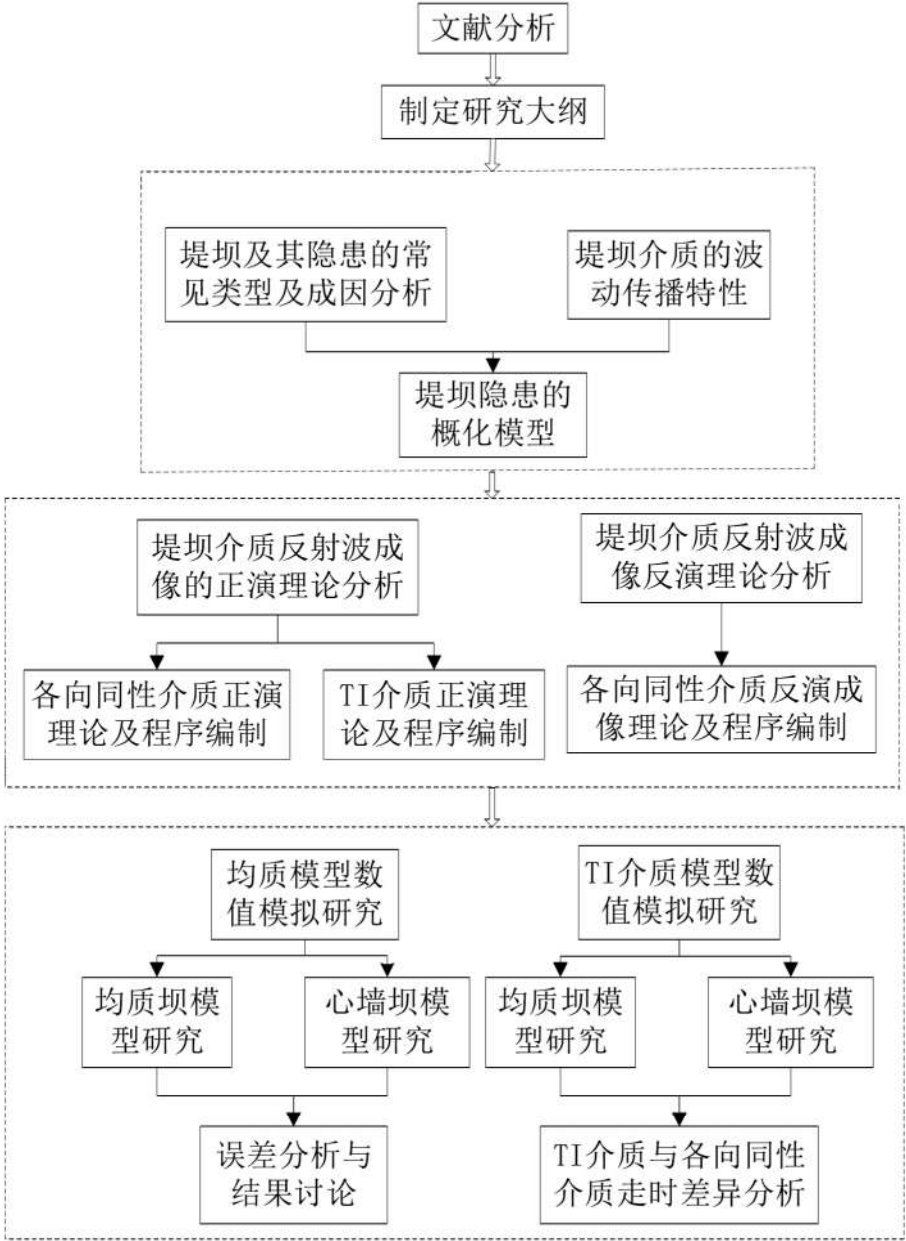


图 1.1 本文研究技术路线图

第二章 堤坝介质波动特性及隐患的概化模型研究

2.1 堤坝及其隐患的常见类型分析

2.1.1 堤坝的常见类型分析

堤坝由堤和坝组成，亦称为挡防水的构筑物或建筑物。堤防主要包括沿着河、渠、湖、海岸或是行洪区、分洪区、围垦区的边缘修筑的挡水建筑物；按功能可分为防浪堤、防洪堤、行洪堤、干堤、支堤、子堤、遥堤、隔堤等；按其修筑的位置可分为江堤、河堤、湖堤、海堤及围堤等；按建筑材料可分为石堤、土堤、土石混合堤等；大坝是用来防止洪水泛滥，生产水力发电，或是储水作饮食或灌溉之用，建筑在溪流、河流和河口的屏障。其主要有两大类：土石坝和混凝土坝。土石坝按其施工的方法可以分为：冲填式土石坝、定向爆破堆石坝、水中填土坝和碾压式土石坝。其中冲填式土石坝主要是利用水力开采及运输，定向爆破则是利用抛石冲击力的压实性能，水中填土坝主要是利用土粒在水中崩解进行压密。冲填式土石坝和水中填土坝都是靠水的渗流带动颗粒向下运动而压密的，压实性能远远不如机械碾压，且排水固结很慢，孔隙水压力很大，故只适用于坝坡较缓的低坝。经过实践检验表明，碾压土石坝是目前应用得最为广泛、修筑质量最好的坝型。

根据土石料在坝身内的布置及防渗体材料种类及所处位置，碾压土石坝可分为以下几种主要的类型：均质坝，一般主要是由一种土料构成，如沙壤土，主要起到防渗及支撑作用；土质心墙坝，中央防渗体主要由相对不透水或者弱透水的土料构成，坝体上下游则可用透水的砂砾石土料形成坝壳，从而对心墙起到保护的作用；土质斜墙坝，上游防渗体主要由相对不透水或者弱透水的土料构成，下游支撑体则利用透水砂砾石土料；土质斜心墙坝，防渗体由相对不透水或弱透水材料构成，结构形式为下部斜墙、上部心墙，上下游两侧以透水土石料组成坝壳，支撑和保护防渗体；面板堆石坝，上游防渗面板由钢筋混凝土、沥青混凝土、塑料膜或土工膜等材料组成，其支撑体由透水或半透水砂砾石土料或者加上块石等组成。

2.1.2 堤坝隐患的常见类型分析

堤坝主要的作用为挡水防水，故防渗是堤坝修筑及运行期间时刻要面临的最主要问题，防渗结果的好坏直接决定了工程的质量。在运营期间由于各种原因，造成堤坝结构出现了隐患，本节试图对隐患类型及成因进行分析。

(1) 常见的堤坝隐患类型包括：

①堤坝基础中的隐患：包括在施工期间未被处理的软弱面及早期自行生成的渗漏通道，还有施工及运营期间由于沉降不均匀而产生的裂缝等。软弱夹层及渗漏层的区域面积变化较大，大小及位置不一；

②堤坝坝体的隐患：主要包括基础沉降不均引起的坝体裂缝、高水压对于坝体持续的压力造成的孔洞、虫蚁等生物破坏产生的洞穴等。其主要特征体现为尺寸大小不一、埋深变化较大，裂缝的开裂方向不一，有横缝、纵缝及交错缝等；

③堤坝施工中的隐患：由于施工质量不过关，如对于防渗层处理不完善、施工过程不连续、防渗体搅拌不均匀等，对于堤坝的压实质量不够等。

(2) 堤坝渗透破坏的成因分析

堤坝上游与下游存在水头差，进而在其内部产生了渗流，并形成了浸润线，随着水位的起伏不定，浸润线也时刻发生着变化，从而产生坝体结构的破坏。依据渗漏破坏的发生机理，可以把其分为四类：流土，主要是指在高渗透压力的作用下，动水压力超过土重度时，土体表面隆起、浮动或是某一颗粒群的同时起动而流失的，其可发生在粘土中，也可发生在非粘性土中，在粘性土中表现为土块隆起、浮动、膨胀、断裂等现象，在非粘性土中表现为泉眼群、土体翻滚、砂沸等现象，主要发生在渗流出口；接触流土，主要是指渗流在垂直于两种不同介质的接触面上运动，将渗透系数较小的土层中的细颗粒带入渗透系数较大的另一土层的现象，主要发生在坝身与坝基的结合面，也发生在颗粒粒径相差较大的两层土之间；管涌，主要是指在渗透水压力的作用下，土中的细颗粒结构在粗颗粒形成的空隙通道中流动，进而使得孔隙不断的扩大，渗流量亦随之加大，最终导致在土体中形成了一条贯通的渗漏通道，土体发生破坏的现象，可能发生在渗流出口，也可能发生在土体内部；接触冲刷，主要是指渗流顺着两种不同介质的接触面而流动并带走细颗粒的现象，主要发生在堤身与穿堤建筑物的结合面。

上述四种破坏中，所有破坏形式全部存在于无粘性土中，而粘性土则有除管涌外的其他三种破坏形式，可参照下表来对于无粘性土管涌与流土进行判别。

表 2-1 流土与管涌的判别（无粘性流土）

土类	土颗粒组成特点	渗透变形形式
正常级配砂砾石	$C_v < 10$	流土
	$10 < C_v < 20$	流土或管涌
	$C_v > 20$	管涌
缺少中间颗粒的砂砾石	$P_x < 25\% \sim 30\%$	管涌
	$P_x > 30\%$	流土

表中 C_v 为无粘性土的不均匀系数， $C_v = d_{60}/d_{10}$ ； P_x 为低于级配曲线某点的粒径

含量： d_{10} 、 d_{60} 分别为过筛重量为 10%及 60%的土粒直径。

2.2 堤坝介质的波动传播特性

堤坝的取材一般分为两种，一种属于纯土料，另一种属于土石复合材料，大部分堤坝采用的是土石复合材料。不同的介质有着不同的波动特性，故本节主要对于堤坝介质的波动特性进行研究。

2.2.1 堤坝介质中土介质的波动传播特性

堤坝因其挡水特性，上游坝体长期位于水中，故可把其介质视为饱和，故在此简要介绍基于 Boit 理论的饱和土体的波动传播特性。在土颗粒不可压缩的情况下存在着三种体波，包括 P_1 、 P_2 两种压缩波及一种 S 剪切波。本文基于反射波成像原理，在地震反射原理中所需提取的主要为走时，反之为波速，故主要分析影响波速的一些参数。

(1) 频率对于波速及波速衰减的影响： P_2 波较 P_1 波及 S 波衰减的更快，说明在传播的过程中 P_1 波和 S 波能够更完整的传播；

(2) 孔隙率对于波速及波速衰减的影响：孔隙率与三种波速近似呈线性关系， P_1 波的速度随着孔隙率的增大而逐渐减小， P_2 波及 S 波的速度随着孔隙率的增大而逐渐增大；

(3) 渗透性对于波速和波速衰减的影响：对于渗透性影响较大的为 P_2 波的波速，其余两种波的波速影响不大，但三种波的衰减对于渗透性的改变均比较敏感；

(4) 流体粘滞性对于波速和波速衰减的影响： P_2 波波速对于粘滞性的改变较为敏感，其余两种波的波速则影响不大，但三种波的波速衰减对于粘滞性的改变均较为敏感；

2.2.2 堤坝土石复合介质的波动传播特性

堤坝土石复合介质是由流体相及固相组成的复合介质，其中流体相为液相和气相的复合物，固相主要为土石混合料。土石复合介质属于非均质体，其性质不单取决于多相体的流体相及固相的性质，同时还取决于流-固相等的微观组织结构（如排列方式）。本节主要通过流固两相介质等效模型、流体相介质等效模型、固体相介质等效模型的结合来研究多相土石复合介质的波动特性。

根据弹性波速理论，多相土石复合介质的宏观弹性波传播速度为：

$$\begin{cases} v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{K_{eff} + \frac{4}{3}G_{eff}}{\rho}} \\ v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_{eff}}{\rho}} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中：K、G 分别为体积模量、剪切模量； ρ 为土石复合介质的密度； K_{eff} 为土石复合介质的等效体积模量； G_{eff} 为土石复合介质的等效剪切模量。

流固两相介质下的 Gassman 方程为：

$$\begin{cases} K_{eff} = \frac{K_{seff}\phi\beta + K_f\alpha}{\phi\beta - \alpha(1 - \beta)} \\ \alpha = 1 - \frac{K_{seff}}{K_s} \\ \beta = 1 - \frac{K_f}{K_s} \end{cases} \quad (2-2)$$

式中： K_{seff} 为干燥状态的颗粒骨架的体积模量； K_s 为颗粒体积模量； K_f 为流体相的体积模量； Φ 为介质的孔隙度。

流体相的体积模量为：

$$K_f = \frac{K_a K_w}{S_w(K_a - K_w) + K_w} \quad (2-3)$$

式中： K_a 为气体体积模量； K_w 为液体体积模量； S_w 为气体饱和度。

土石复合介质的固体相模量为：

$$K_{seff} = \sqrt[3]{\frac{c^2(1-\phi)^2 G_s^2}{18\pi^2(1-\nu)^2} p} \quad (2-4)$$

式中： c 为平均接触点数； G_s 为颗粒材料的剪切模量； ν 为泊松比； p 为静水压力。

固体土石颗粒的剪切模量为：

$$G_s = \frac{1}{2} \left[G_{ss} + \frac{f_t}{(G_{ts} - G_{ss})^{-1} + \frac{2f_s(K_{ss} + 2G_{ss})}{5G_{ss}(K_{ss} + \frac{4}{3}G_{ss})}} + G_{st} + \frac{f_t}{(G_{ss} - G_{st})^{-1} + \frac{2f_s(K_{ts} + 2G_{ts})}{5G_{ts}(K_{ts} + \frac{4}{3}G_{ts})}} \right] \quad (2-5)$$

固体土石颗粒的体积模量为：

$$K_s = \frac{1}{2} \left[K_{ss} + \frac{f_t}{(K_{ts} - K_{ss})^{-1} + f_s (K_{ss} + \frac{4}{3} G_{ss})^{-1}} + K_{ts} + \frac{f_s}{(K_{ss} - K_{ts})^{-1} + f_t (K_{ts} + \frac{4}{3} G_{ts})^{-1}} \right] \quad (2-6)$$

式中：G_{ss}、G_{ts} 分别为石颗粒、土颗粒的剪切模量；K_{ss}、K_{ts} 分别为石颗粒、土颗粒的体积模量；f_t 为土颗粒相的体积分数；f_s 为石颗粒相的体积分数。

将式 (2-3)、式 (2-4)、式 (2-5)、式 (2-6) 代入到式 (2-2) 中，可得多相土石复合介质的等效体积模量为：

$$K_{eff} = K_{seff} + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha - \phi}{K_s} + \frac{\phi}{K_f}} = \sqrt[3]{\frac{c^2 (1 - \phi)^2 G_s^2}{18\pi^2 (1 - \nu)^2} \rho g h} + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha - \phi}{K_s} + \frac{\phi [S_w (K_a - K_w) + K_w]}{K_a K_w}} \quad (2-7)$$

$$\rho = \rho_d (1 + \omega) \quad (2-8)$$

$$\rho_d = \rho_{de} (1 - \phi) + \phi \rho_a \quad (2-9)$$

$$\rho_{de} = f_t \rho_t + f_s \rho_s \quad (2-10)$$

式中：c—为平均的接触点数，且其表达式为 $c = 25.408\phi^2 - 43.213\phi + 21.547$ ；

ϕ —为孔隙度；

ρ —为土石复合介质的密度；

ω —为含水量；

ρ_d —为土石固体相的等效密度，即干密度值；

ρ_{de} —为固体颗粒的等效密度；

ρ_t —为土的密度；

ρ_s —为石颗粒的密度；

ρ_a —为空气的密度；

f_t —为土的体积分数，其表达式为 $f_s = V_s = \frac{n\rho_d}{(n+1)\rho_s}$ ；

f_s —为石的体积分数，其表达式为 $f_t = V_t = \frac{\rho_d}{(n+1)\rho_t}$ ；

α —为 Biot 孔隙的弹性系数，其表达式为 $\alpha = 1 - \frac{K_{seff}}{K_s}$ ；

ν —为泊松比；

h —为土石介质的厚度；

S_w —为水饱和度；

K_a —为气体的体积模量，取值 $K_a \approx 0.1 \text{MPa}$ ；

K_w —为水的体积模量，取值 $K_w \approx 2 \text{GPa}$ ；

K_{seff} —为固相介质的等效体积模量，表达式为 $K_{seff} = \sqrt[3]{\frac{c^2(1-\phi)G_s^2}{18\pi^2(1-\nu)^2}\rho gh}$ ；

K_s —为固体颗粒的体积模量，

$$K_s = \frac{1}{2} \left[K_{ss} + \frac{f_t}{(K_{ts} - K_{ss})^{-1} + f_s \left(K_{ss} + \frac{4}{3} G_{ss} \right)^{-1}} + \frac{f_s}{(K_{ss} - K_{ts})^{-1} + f_t \left(K_{ts} + \frac{4}{3} G_{ts} \right)^{-1}} \right]$$

G_s —固体颗粒的剪切模量，

$$G_s = \frac{1}{2} \left[G_{ss} + \frac{f_t}{(G_{ts} - G_{ss})^{-1} + \frac{2f_s(K_{ss} + 2G_{ss})}{5G_{ss} \left(K_{ss} + \frac{4}{3} G_{ss} \right)} + G_{st}} + \frac{f_s}{(G_{ss} - G_{ts})^{-1} + \frac{2f_t(K_{ts} + 2G_{ts})}{5G_{ts} \left(K_{ts} + \frac{4}{3} G_{ts} \right)}} \right]$$

可以看出，多相土石复合介质的等效体积模量 K_{eff} 与孔隙度 ϕ 、泊松比 ν 、土石复合介质的干密度 ρ_d 、水饱和度 S_w 、气体体积模量 K_a 、水的体积模量 K_w 、气体密度 ρ_a 、水的密度 ρ_w 、土石体积比 f 、土的体积模量 K_{ts} 和剪切模量 G_{ts} 、岩石的体积模量 K_{ss} 和剪切模量 G_{ss} 等参数有关，得到土石复合介质的等效剪切模量：

$$G_{eff} = G_{seff} = \frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \sqrt[3]{\frac{3c^2(1-\phi)^2 G_s^2}{2\pi^2(1-\nu)^2} \rho gh} \quad (2-11)$$

将得到的计算结果代入式 (2-1) 可得土石复合介质的弹性波传播速度：

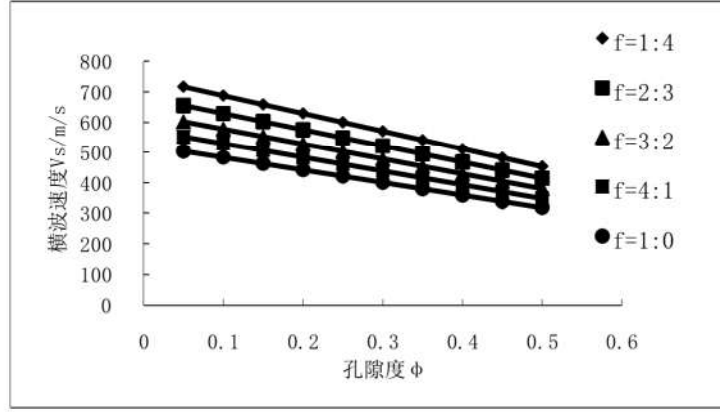
$$v_p = \sqrt{\frac{K_{eff} + \frac{4}{3} G_{eff}}{\rho}} = \left\{ \frac{1}{\rho} \left\{ \sqrt[3]{\frac{c^2(1-\phi)^2 G_s^2}{18\pi^2(1-\nu)^2} \rho gh} + \frac{\alpha^2}{\frac{\alpha-\phi}{K_s} + \frac{\phi[S_w(K_a - K_w) + K_w]}{K_a K_w}} \right\} + \frac{4}{3} \left[\frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \sqrt[3]{\frac{3c^2(1-\phi)^2 G_s^2}{2\pi^2(1-\nu)^2} \rho gh} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-22)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G_{eff}}{\rho}} = \left\{ \frac{1}{\rho} \left[\frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \sqrt[3]{\frac{3c^2(1-\phi)^2 G_s^2}{2\pi^2(1-\nu)^2} \rho gh} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-23)$$

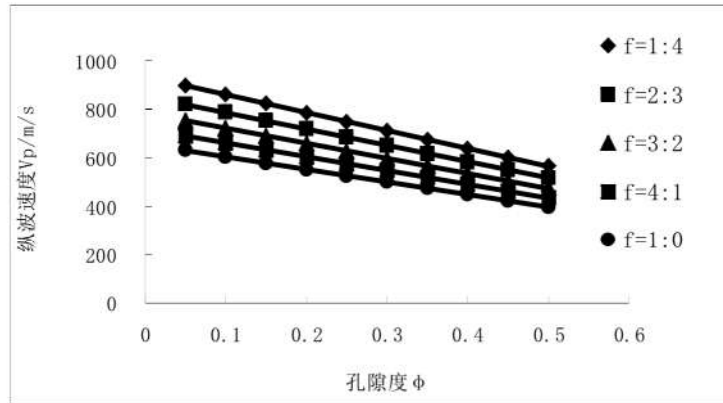
在上式中, ρ 为土石复合介质的密度, $\rho = \varphi[S_w\rho_w + (1-S_w)\rho_w] + (1-\varphi)\rho_{de}$

由以上公式中得到了波速与土石复合介质中的孔隙度、干密度、泊松比、土石比、水饱和度、深度等之间的关系, f 表示土石比, 下面对此进行分析:

(1) 孔隙度与波速的关系



(a) 孔隙度与 V_s 的关系



(b) 孔隙度与 V_p 的关系

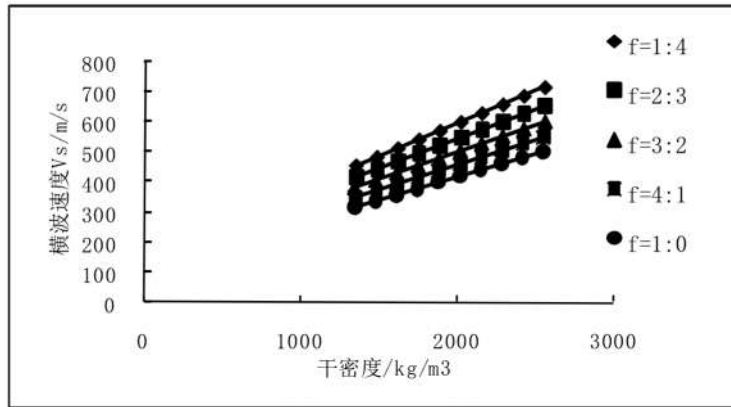
图 2.1 孔隙度与波速的关系

通过上图可知, 在相同条件下波速随着孔隙度的增加而下降, 横波与纵波下降趋势一致, 孔隙度与波速之间呈近似线性关系:

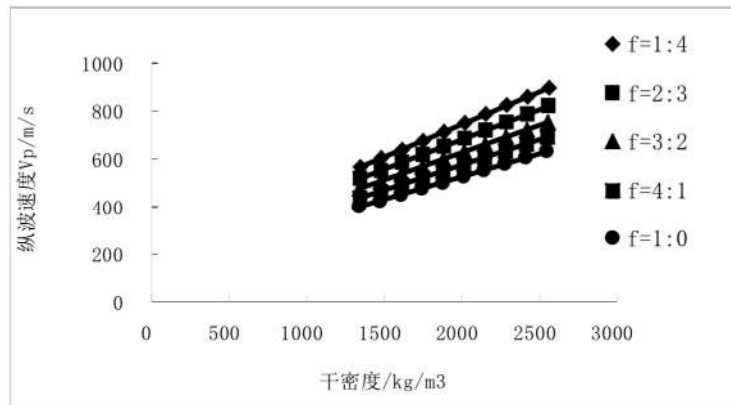
$$\begin{cases} v_p = a\phi + b \\ v_s = c\phi + d \end{cases} \quad (2-24)$$

式中: a, b, c, d 均为常数。

(2) 干密度与波速的关系



(a) 干密度与 V_s 的关系

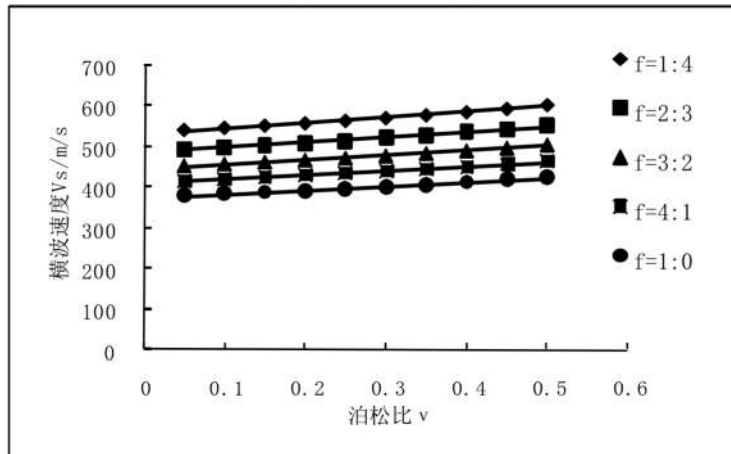


(b) 干密度与 V_p 的关系

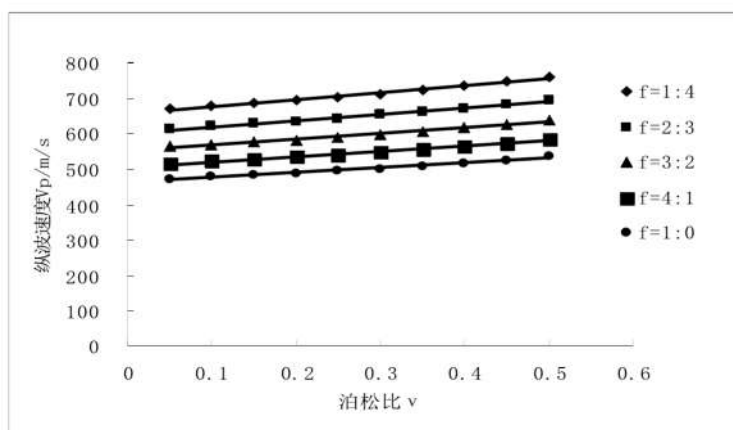
图 2.2 干密度与波速的关系

由上图可以看出干密度与波速之间呈幂函数关系, $v_p = a\rho_d^a$, $v_s = c\rho_d^d$, 其中 a, b, c, d 均为常数, 取值范围为: $a \approx 1.3328 \sim 0.8248$, $b \approx 0.7828 \sim 0.7881$, $c \approx 0.9412 \sim 0.5893$, $d \approx 0.7802 \sim 0.7814$, 相干值大于 0.99。

(3) 泊松比与波速的关系



(a) 泊松比与 V_s 的关系

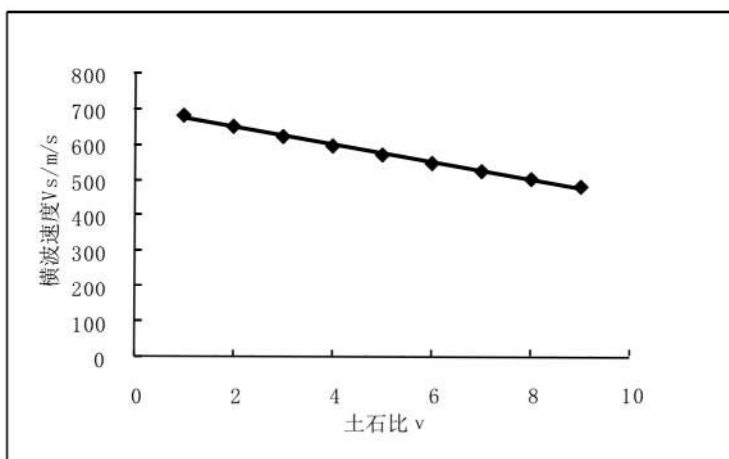


(b) 泊松比与 V_p 的关系

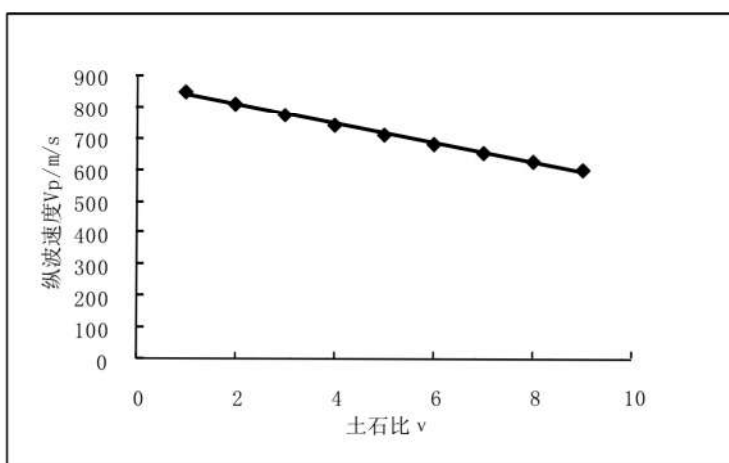
图 2.3 波速比与波速的关系

由上图可知波速随着泊松比的增加而增加，但增幅不明显。

(4) 土石比与波速的关系



(a) 土石比与 V_s 的关系

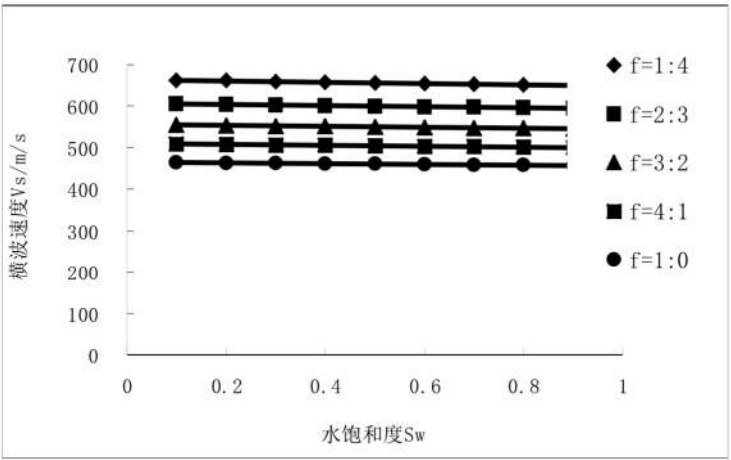


(b) 土石比与 V_p 的关系

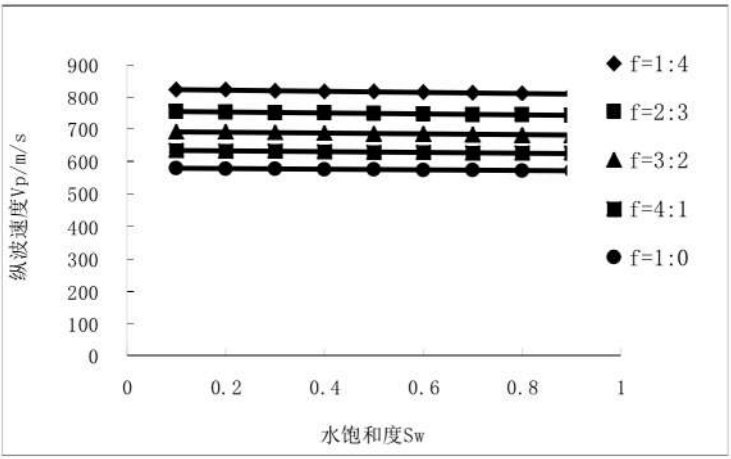
图 2.4 土石比与波动的关系

由上图可知，波速大小随着土石比的增加而减小。

(5) 水饱和度与波速的关系



(a) 水饱和度与 V_s 的关系

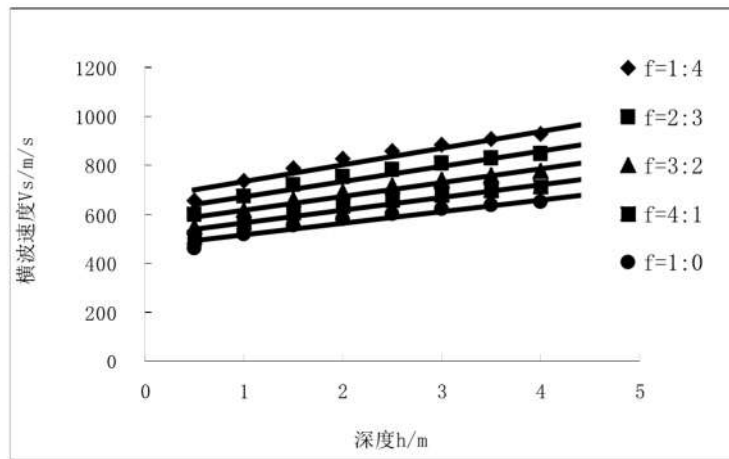


(b) 水饱和度与 V_p 的关系

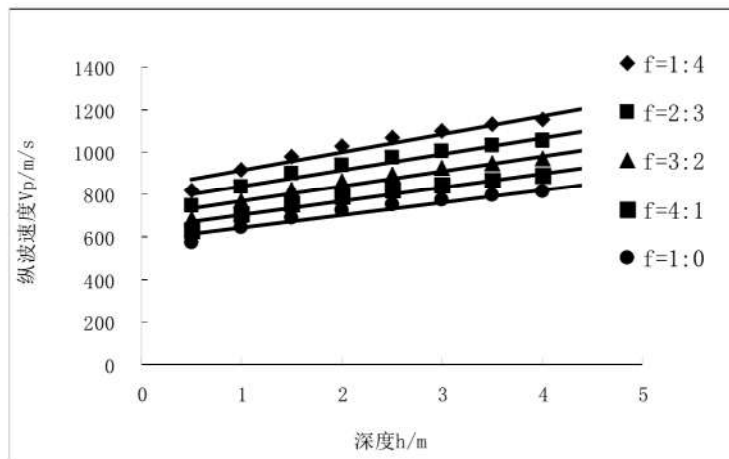
图 2.5 水饱和度与波速的关系

由上图可以看出，随着水饱和度的增加，横波与纵波波速均减小，但降幅很小。

(6) 深度与波速的关系



(a) 深度与 V_s 的关系



(b) 深度与 V_p 的关系

图 2.6 深度与波速的关系

由上图可知无论是横波波速还是纵波波速均随深度的增加而增加。

2.3 堤坝隐患的概化模型

堤坝隐患主要包括坝基、坝体隐患类型，最主要的体现在渗漏破坏上，下面选取几个有代表性的模型进行分析。根据《堤防工程设计规范 GB50286-2013》^[66]、《碾压式土石坝设计规范 SL274-2001》^[67]对于堤防及土石坝结构的设计要求，本文在采用模型时暂时忽略材料的性质，把堤坝结构视为一致，堤坝坡度假定为 1:1.5。

2.3.1 均质堤坝的隐患概化模型

均质堤坝的特点是坝体材料一致，断面不分坝壳和防渗体。

(1) 坝体渗漏的概化模型：均质坝体内部的渗漏破坏成因有多种，如在施工过程中碾压不密实，分层碾压过程中施工不规范，在层与层之间没有设置搭接。

当堤坝开始投入运行，上游蓄水后，由于水头差的作用产生高渗透压力，坝体内部的孔隙水压力增大，是的土体的有效应力减小，随着水流的持续入渗形成贯通，使得坝体内部形成渗漏通道，进而发生管涌、流土、接触冲刷和接触流土等病害特征，最终危及坝体的稳定及安全，坝体渗漏的立面及剖面图如图 2.7。

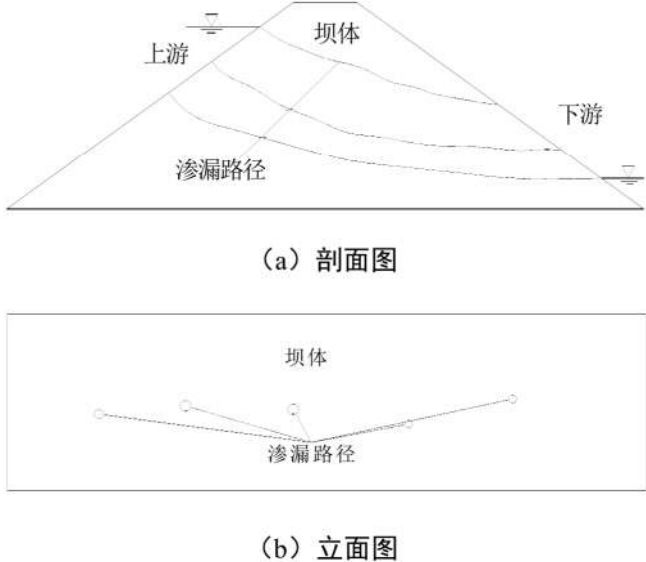


图 2.7 坝体渗漏概化模型图

(2) 坝体孔洞的概化模型：均质坝体内部的孔洞形成主要包括施工期及使用期。在施工期，由于使用的坝体材料颗粒级配不符合要求，监理人员在工作中的不规范，坝体内部存在缺陷。在运行期间，由于地震荷载等外界作用力的作用下使得坝体产生不均匀沉降，产生孔洞，这些隐患时刻危害着坝体的安全。坝体孔洞的立面及剖面如图 2.8。

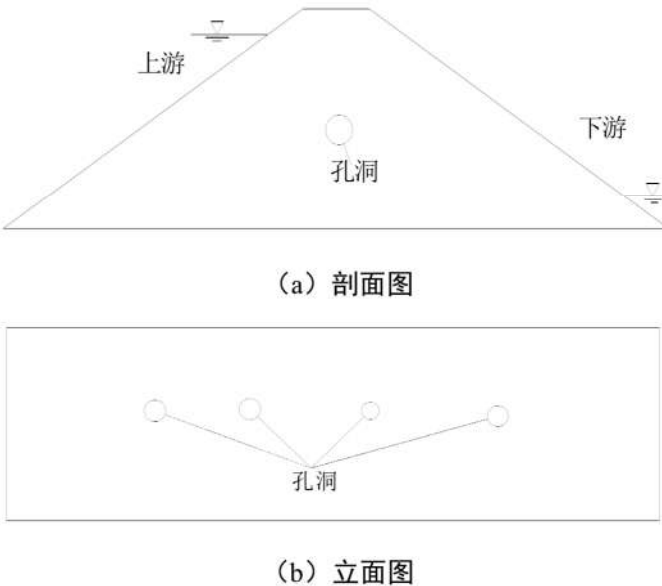
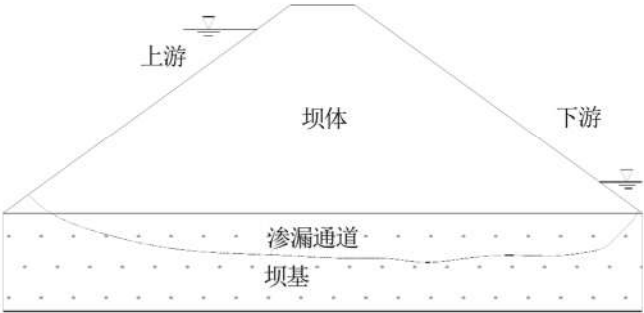
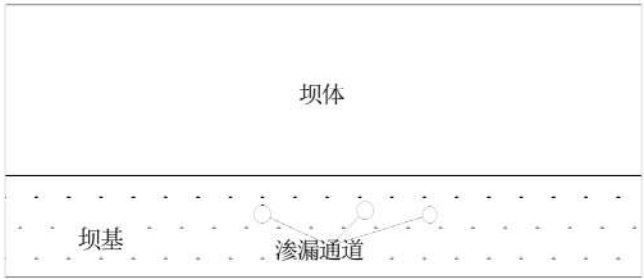


图 2.8 坝体孔洞概化模型图

(3) 坝基渗漏的概化模型：均质坝坝基渗漏主要是由于未处理的渗漏层和未清理的软弱层的存在，其厚度变化范围较大，渗漏通道可以由坝体内部传到坝基，也可独立存在于坝基内部。坝基渗漏对于坝基稳定的影响很大，故在施工中应及时处理，避免在运行后发现而难以处理。坝基渗漏的立面及剖面如图 2.9。



(a) 剖面图



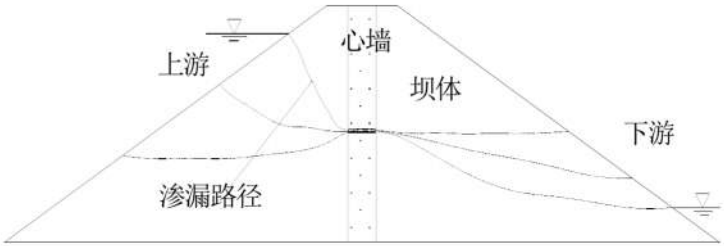
(b) 立面图

图 2.9 坝基渗漏概化模型图

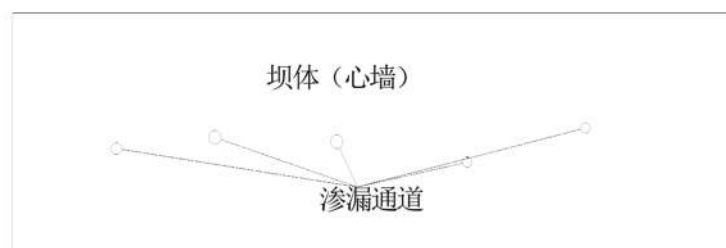
2.3.2 心墙坝的隐患概化模型

心墙坝与均质坝的隐患基本类似，区别之处在于均质坝的渗漏路径存在一定的坡降，而心墙坝内的渗漏路径则会随着心墙隐患的路径而有所差异。

(1) 坝体渗漏的概化模型：心墙坝的坝体内部渗漏决定了心墙的抗渗性，隐患的出现一般是心墙在施工过程中存在缺陷，形成了隐性的通道。在运行期间，由于外部荷载的作用产生不均匀沉降，使得心墙开裂从而产生裂缝。渗漏路径一般都会经过心墙的隐患位置。其立面和剖面图如图 2.10。



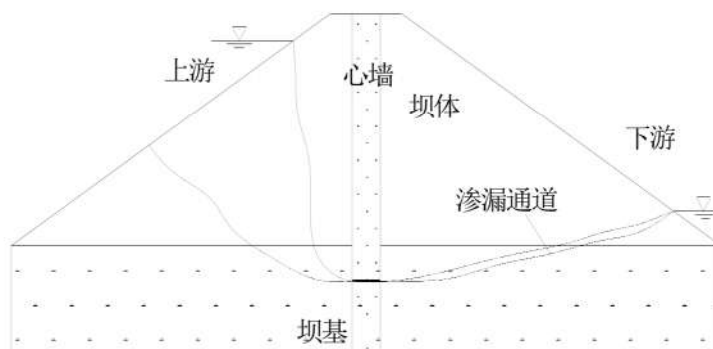
(a) 剖面图



(b) 立面图

图 2.10 坝体渗漏概化模型图

(2) 坝基渗漏的概化模型：坝基渗漏的决定因素在于心墙，心墙的隐患位置决定了是坝基渗漏还是坝体渗漏。当心墙缺陷位于坝基内部时即为坝基渗漏，亦与坝基本身存在缺陷有一定关系，故施工中坝基的处理显得尤为重要，在进行心墙的灌浆时施工质量也要严格保证，其立面及剖面图如图 2.11。



(a) 剖面图



(b) 立面图

图 2.11 坝基渗漏概化模型图

2.4 本章小结

本章通过总结堤坝及其隐患的常见类型及对于成因分析，针对堤坝材料的不同类型，利用弹性波理论研究了堤坝材料的波动传播特性，分析了孔隙度、干密度、泊松比、土石比、水饱和度、深度等物理参数对堤坝介质波速的影响；根据堤坝不同形式的不同隐患类型，研究了不同堤坝隐患的概化模型。

第三章 堤坝介质反射波成像的正演方法分析

我国的堤防工程和土石坝结构大部分建于二十世纪五十年代，由于堤坝本身的自重及外部营造力的作用，其内部结构更倾向于各向异性介质，与横观各向同性介质更为吻合，本文不仅对于各向同性介质下的反射波成像技术进行研究，还将对各向异性介质中的横观各向同性（TI）介质下的反射波成像技术进行研究。

3.1 各向同性介质反射波正演理论

3.1.1 基本原理

（1）惠更斯原理与斯奈尔定律

惠更斯原理是利用波前概念来研究波的传播，核心思想是把已知波前面（等时面）上的点视为新的波源继续传播，由新的子波群扩展的子波波前的包络线可视为新的波前面。由此原理就可以由某一时刻的波前位置来推断波在每个不同时间所处的波前位置，可以形象的说明波从一种介质进入另一种介质时产生的反射、折射、透射、散射等现象。

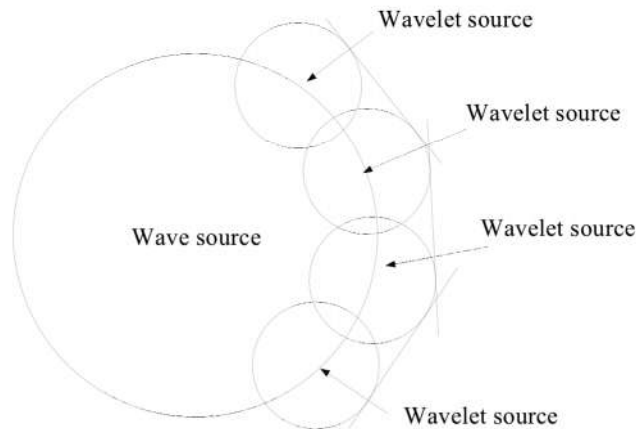


图 3.1 惠更斯原理示意图

斯奈尔定律主要是描述关于光折射的定律，它以其发明者荷兰物理学家斯奈尔命名，它的主要内容为：光在不同界面上入射会产生反射及折射，其中入射光与折射光处于同一平面，且其与界面法线的夹角有着以下关系：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3-1)$$

式中： n_1, n_2 为介质的折射率， θ_1 为入射光与界面法线的夹角， θ_2 为折射光与界面法线的夹角。

（2）费马原理与互易原理

费马原理主要为：波传播的过程中沿着射线路径传播的时间比沿其他任何路径传播的时间都要短，也可以理解为波沿时间最短的路径传播。由此原理可以来确定在已知波速介质中的射线传播形状，其在均匀介质中的传播的射线路径为直线，在非均匀介质中，则是与垂直于波前面的曲线，而不再是直线。

互易原理主要指发射点与接收点的相互交换，不影响在此路径上传播的波形等参数。此原理不仅适用于均匀弹性介质，还可以用于任何形状界面的介质，如不均匀介质及各向异性介质等。

(3) Radon 变换

CT 成像技术的数学基础来自与 Radon 变换及其逆变换，Radon 变换作为一种泛函算子，主要充当的是将一个函数转换成另一个实数。引申入物体内部图像重建时，可以把物体切片的图像利用两个空间变量 x, y 的图像函数 $f(x, y)$ 来表示。在以不同角度观测目标物时，其波场信息为投影函数（入射波的方向角 θ 和观测点的位置 r 的两个变量的函数 $p(r, \theta)$ ）。假定 L 为下图中平面内的任意直线，则可知 $f(x, y)$ 沿着直线 L 的线积分：

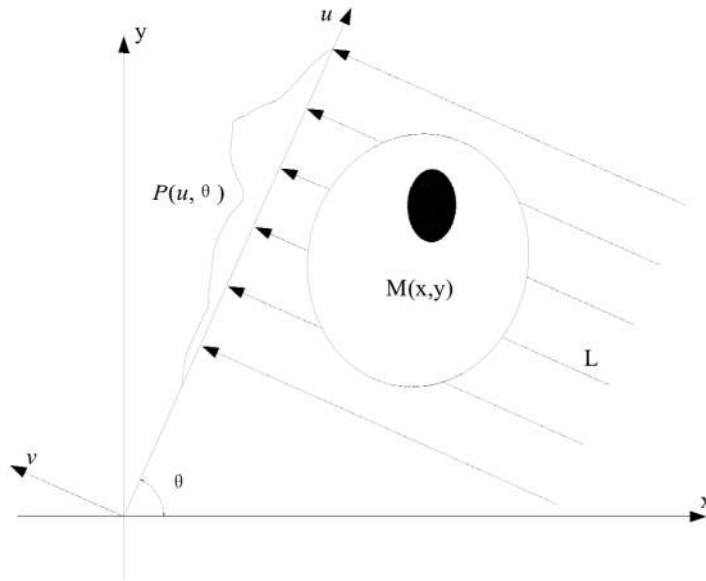


图 3.2 Radon 变换原理图

$$p = \int_L f(x, y) dl \quad (3.2)$$

对于直线 L ，可以用如下方程来表示：

$$\begin{cases} x = r \cos \theta - s \sin \theta \\ y = r \sin \theta - s \cos \theta \end{cases} \quad (3.3)$$

可以把式 (3.3) 代入到式 (3.2) 中，这样可以把笛卡尔坐标形式转换成极坐

标的形式，即 $f(x,y)$ 的 Radon 变换，可记作 $\Re f(r, \theta)$ ：

$$\Re f(r, \theta) = p(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f((r \cos \theta - s \sin \theta), (r \sin \theta + s \cos \theta)) ds \quad (3.4)$$

利用傅里叶变换，以 $\tilde{F}(u, v)$ 表示函数 $f(x, y)$ 的 Fourier 变换，则截面函数的二维傅里叶变换为：

$$\tilde{F}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (3.5)$$

此时定义 θ 下的一条投影 $p(r, \theta)$ 的一维傅里叶变换为 $\tilde{P}_\theta(\omega)$ ，其表达式如下：

$$\tilde{P}_\theta(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p_\theta(t) e^{-2\pi i \omega t} dt \quad (3.6)$$

此时经过推导可发现

$$\tilde{P}_\theta(\omega) = \tilde{F}(u, v) \quad (3.7)$$

上式表明，在沿某一方向的投影数据 $p(r, \theta)$ 的一维傅里叶变换值 $\tilde{P}_\theta(\omega)$ 与求参数的 $f(x,y)$ 的二维傅里叶变换值 $\tilde{F}(u, v)$ 相等，上述即为转换法的基本定理：投影断面定理（Projection Slice Theorem）。

3.1.2 反射波成像基本方程

波动方程：

$$\nabla^2 u(r, \omega) - \frac{1}{v^2(r)} \cdot \frac{\partial^2 u(r, \omega)}{\partial^2 t} = 0 \quad (3.8)$$

上式中 t 为走时， $v(r)$ 是关于速度的函数。

假设 $v(r)$ 为常数，则可对于式（3.8）进行求解，可得 $u = Ae^{r\omega}$ 。

假设 $v(r)$ 不为常数，而是随着空间变化的一个连续函数，此时可以近似的认为，不同的振幅 $A(r)$ 有其相应的不同频率 ω ，但其与相位无关，此时可得方程（3.8）的形式解：

$$u(r, \omega) \approx \omega^\beta e^{i\omega} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(r)}{(i\omega)^j} \quad (3.9)$$

式中， β 属于待定常数。

此时把所求得的形式解代入式（3.8）则有：

$$\sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \frac{A_j}{(i\omega)^{j-2}} \left[\nabla^2(t) - \frac{1}{v^2(r)} \right] + \frac{\nabla^2 t A_j}{(i\omega)^{j-1}} + \frac{\nabla^2 A_j}{(i\omega)^j} \right\} = 0 \quad (3.10)$$

此时对于上式进行化简，假定高频近似，频率 ω 趋于 0，可得：

$$\nabla^2(t) = \frac{1}{v^2(r)} \quad (3.11)$$

上式称为程函方程，主要是表述速度分布与波前面的空间关系，反映的是速度分布与走时的相对数量关系，是一个基本关系式。此时再将上式进行转化，走时利用慢度 $S(x,y)$ (速度的倒数) 来进行表示，如下：

$$T = \int_{ray} \frac{1}{v(x,y)} dr = \int_{ray} S_{(x,y)} dr \quad (3.12)$$

此时波速层析成像的概念可以由下式来表示：

$$T = \int_{ray} S_{(x,y)} dr \rightarrow S_{(x,y)} \rightarrow V_{(x,y)} \quad (3.13)$$

上式中： $s(x,y)$ 、 $v(x,y)$ 均为待测参数， $s(x,y)$ 为慢度参数， $v(x,y)$ 为待测物体的波速分布， T 为待测参数投影值，主要是指路径上实测的波速走时。求解波速成像问题主要就是要求解(3.13)，由实测走时 T 演算慢度 $s(x,y)$ ，从而可以得到速度分布 $v(x,y)$ 。由此可见要解决波速成像问题主要为两个步骤：确定积分路径 ray 和求解待测参数 $v(x,y)$ ，可分为正演和反演计算两个问题。

3.2 各向异性介质反射波正演理论

3.2.1 堤坝介质的波动理论分析

在上章中对于堤坝介质的波动传播特性进行了分析，然而在实际利用地震波勘探手段进行地震勘探时，对于介质的区分与试验室处理手段有一定的区别，在探测中只关注波形及相应的走时（或是相应的波速），地震勘探中对于介质的区分有其相应的理论。其把介质分为各向同性介质与各向异性介质（当然各向同性介质也属于各向异性介质中的特殊一种）。

各向异性介质的弹性波方程

弹性动力学问题涉及的介质均为弹性介质，当介质在外力的作用下产生了变形，这种形变即属于弹性形变，当外力撤销后，形变消失。地震波传播所需介质形变即可归结为弹性形变，在弹性动力学中有三个基本方程：弹性本构方程（虎克定律）、运动微分方程（纳维尔方程）、几何方程（柯西方程），这三个基本方程用来描述弹性介质内部质点的位移、应力和应变之间的相互联系的普遍规律，是建立各向异性介质弹性波动方程的基础。

①本构方程（广义胡克定律）

弹性动力学问题是指物体在外力的作用下产生了变形，这种变形属于弹性变形。本构方程描述的是应力与应变之间的关系，它反应了介质所固有的物理性质。

满足广义虎克定律的弹性体称为线性弹性体，适用于小变形下的固体。对于线弹性体，应力张量与应变张量之间呈以下线性关系：

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \quad (3.14)$$

上式中 σ_{ij} 为应力张量， E_{kl} 为应变张量， C_{ijkl} 为四阶张量的元。 $[C_{ijkl}]$ 为介质的弹性刚度系数模量，其内部元素称为弹性刚度系数，简称弹性常数。每个下标均可以为 1,2,3。此时每个应力和应变张量均有 9 个分量，故刚度张量有 81 个标量元。

对于应变张量进行分析，因其有对称性，可以发现其只有六个独立分量。

$$E_{kl} = E_{lk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3.15)$$

而应力张量同样具有对称性，同样是只有六个独立分量，刚度张量也有对称性，利用这些对称性可以得到各向异性介质的弹性本构方程：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{55} \\ \sigma_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ E_{44} \\ E_{55} \\ E_{66} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

对于各向同性介质（均质体），可将上式进行一定的简化，此时引入两个拉梅常数 λ ， μ ，此时定义 $c_{12} = c_{11} - 2c_{44} = \lambda$ ； $c_{11} = \lambda + 2\mu$ ； $c_{44} = \mu$ 。则用这两个弹性常数就可以描述各向同性完全介质：

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{44} \\ \sigma_{55} \\ \sigma_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ E_{44} \\ E_{55} \\ E_{66} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

于是，对于各向同性完全弹性介质，由（3.17）弹性刚度张量分量式可简写为：

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.18)$$

由此分量式可写成：

$$\sigma_{ij} = \lambda E_{kk} \delta_{ij} + 2\mu E_{ij} \quad (3.19)$$

②运动微分方程（纳维尔方程）

当外力作用于弹性物体时，此时会转化成作用于物体的内力，从而产生应变

和位移，形成相应的弹性场。运用牛顿第二定律建立运动微分方程：

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = \mathbf{L}\boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{F} \quad (3.20)$$

式中： ρ ， t 分别为介质密度及时间变量； $\mathbf{U} = (u_x, u_y, u_z)^T$ 是位移矢量；

$\mathbf{F} = (f_x, f_y, f_z)^T$ 是单位质量元素上的体力向量； $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力向量； \mathbf{L} 是偏导数算子矩阵，具体表示如下：

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

③几何方程（柯西方程）

几何方程描述的是位移与应变之间的关系，其表达式为：

$$\mathbf{E} = \mathbf{L}^T \mathbf{U} \quad (3.22)$$

其中， \mathbf{E} 为应变向量， \mathbf{U} 为位移矢量， \mathbf{L}^T 为偏导数算子矩阵 \mathbf{L} 的转置，上式可以写成下标形式：

$$E_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3.23)$$

④各向异性介质波动方程

根据上面所提到的本构方程、运动微分方程、几何方程可以建立各向异性介质的弹性波一般波动方程：

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = \rho f_i \quad (3.24)$$

上式以位移来表示波动方法，介绍了各质点在不同时刻的位移情况及在介质中的传播规律，此时再配以确定的边界及初始条件，便可构成相应的地震波动问题。

3.2.2 各向异性介质的分类

地震学家按照地球介质中对称性，把各向异性介质分为：1、极端各向异性（arbitrary anisotropy），这种介质属于非对称性系统或称为三斜系统（triclinic system），没有对称面，刚度矩阵具有 21 个独立弹性常数。这是各向异性介质的一

般形式，可以用来描述具有任意方向各向异性的岩石介质；2、单斜各向异性（monoclinic anisotropy），其刚度矩阵具有 13 个独立弹性常数，且只有一个对称面，一般认为由不同时期的两套非正交的平行裂隙而形成，其对称面垂直于两套裂隙面的交线；3、正交各向异性（orthorhombic anisotropy），其具有三个相互正交的对称面，专家认为其是由地幔中相对于扩张中心排列的正交晶体橄榄石引起，其刚度矩阵具有 9 个独立弹性常数，属于一种实际地球介质模型；4、横观各向同性介质（transversely isotropy），其属于具有柱对称轴的介质，根据其对称轴在空间定向是垂直还是水平又分别称为 VTI 介质和 HTI 介质，还包括具有倾斜对称轴的 TTI 介质，HTI 和 VTI 介质均属于其特殊情况。TI 介质刚度矩阵具有 5 个独立的弹性系数；5、各向同性介质（isotropy），其所有平面都是对称面，弹性特性在所有方向都是相同的，其刚度矩阵只需 2 个拉梅常数即可表示。本文的主要研究对象为横观各向同性介质及各向同性介质。

各向同性介质即为均质，横观各向同性介质又可分为 VTI 介质和 HTI 介质，当介质对称轴与 Z 轴向重合时，称为 VTI 介质，如图 3.3，其主要用于近似表示水平层状介质中周期性沉积的薄层所引起的横观各向同性。当介质的对称轴与 X 轴或 Y 轴重合时，称为 HTI，如图 3.4，主要用于近似表示由于构造应力产生空间排列垂直裂隙群体所引起的横观各向同性。

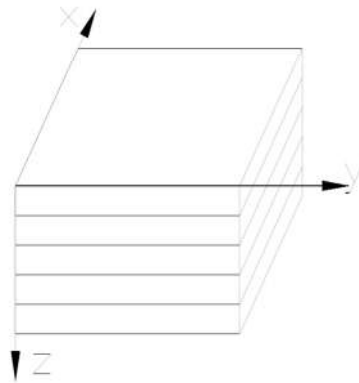


图 3.3 VTI 介质示意图

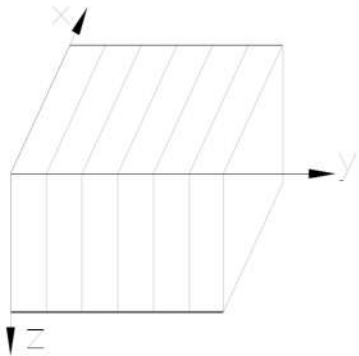


图 3.4 HTI 介质示意图

从前文中可知横向各向异性介质有 5 个独立的弹性常数： $c_{11}, c_{13}, c_{33}, c_{55}, c_{66}$ 。

VTI 介质的弹性矩阵为：

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

其中 $c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12})$, $c_{44} = c_{55}$

HTI 介质弹性矩阵为：

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{33} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

其中： $c_{44} = \frac{1}{2}(c_{33} - c_{23})$, $c_{55} = c_{66}$

3.2.3 各向异性介质的 Christoffel 方程

一般各向异性介质弹性波方程是很复杂的，各向异性介质地震波传播特征在很多方面不同于各向同性的地震波。Christoffel 方程是由波动方程导出的，用以研究地震波的传播特征：相速度和群速度等，在地震波理论研究与实际应用中起着非常重要的作用。弹性波场的规律特点本质上是速度场的规律特点，通过速度场中时间与空间、运动学与动力学的分析研究，实现研究地震波场的分布特点和规律，进而认识地球介质构造和物性分布。所以速度是研究地震波传播规律和描述介质特性的重要参数，是弹性波传播理论中的核心内容。这里根据弹性波方程推导出 Christoffel 方程。

根据弹性波动方程推导 Christoffel 方程的一般形式，也适用于特定的各向异性介质，为了研究各向异性介质的弹性波传播特征，把式 (3.24) 转换下再去掉体力项，则其方程变为

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} U = L(CL^T U) \quad (3.27)$$

则由上式可得弹性波方程的平面波解为

$$\mathbf{U} = \mathbf{P} \exp[ik(\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}) - \omega t] \quad (3.28)$$

式中, $\mathbf{U}=(u_x, u_y, u_z)^T$ 为位移矢量; $\mathbf{x}=(x, y, z)^T$ 为位置矢量; $\mathbf{n}=(n_x, n_y, n_z)^T$ 为波的传播方向; v 为平面波传播的速度也叫相速度; $k=\omega/v$ 为波数; t 为时间; $\mathbf{P}=(p_x, p_y, p_z)^T$ 为波的偏振方向, 在波前满足 $\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - \omega t = \text{const}$ 。

将平面波解 (3.27) 代入波动方程 (3.28), 可以得到

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho v^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho v^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3.29)$$

这里的 Γ 是 Christoffel 矩阵, 其矩阵元素有着具体的表征, 其与介质的弹性参数及波的传播方向相关。根据刚度矩阵的对称性, Christoffel 矩阵同样是对称的, 即 $\Gamma_{12}=\Gamma_{21}$, $\Gamma_{13}=\Gamma_{31}$, $\Gamma_{23}=\Gamma_{32}$, 式 (3-29) 即为著名的 Kelvin-Christoffel 方程。从数学角度来看, Christoffel 方程表征的是特征值问题, 为了使波的偏振矢量 \mathbf{P} 有非零解, 就需要使 Christoffel 矩阵行列式为零。在各向异性介质中, 给定任意传播方向, Christoffel 方程会产生三个可能相速度根, 分别对应 P 波、SV 波和 SH 波。因此, S 波通过各向异性介质时会产生横波分裂现象, 两个 S 波分别以不同的相速度传播和偏振方向传播。在特定的方向上, 分裂的 S 波的相速度是一致的, 以相同的相速度传播, 这时又会产生 S 波奇异性 (shear-wave singularities, Crampin, 1991; Helbig, 1991; Tsvankin, 2001)。在各向同性介质中, 两个 S 波以相同相速度和偏振方向传播。Christoffel 矩阵是实的对称矩阵, 三个本征值对应的偏振矢量 \mathbf{P} 是相互正交的。除了特定的传播方向外, 偏振矢量 \mathbf{P} 和传播方向 \mathbf{n} 既不平行也不垂直, 即在各向异性介质中没有纯 P 波和纯 S 波。由于这个原因, 各向异性波动理论称弹性波为 quasi-P 波、quasi-S 1 和 quasi-S2 波。

3.2.4 横观各向同性介质的 Thomsen 参数表征

(1) Thomsen 参数的表征形式

Thomsen (1986) 推导且提出了一套完整表征各向异性介质中弹性参数的公式, 其将 TI 介质的弹性系数 $c_{11}, c_{13}, c_{33}, c_{55}, c_{66}$ 用 Thomsen 各向异性参数 ε 、 δ 、 γ 三个参数表示。

Thomsen 各向异性参数的表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{13}}{2c_{33}} \quad (3.30)$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{55})^2 - (c_{33} - c_{55})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{55})} \quad (3.31)$$

$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{55}}{2c_{55}} \quad (3.32)$$

式中， ε 是表示胀缩波（P 波）的各向异性参数， ε 越大表示介质的胀缩波的各向异性程度越强，当 $\varepsilon=0$ 时，表示介质的 P 波没有各向异性； δ 是表示 P、S 波的变异系数，表示 P、S 波在垂直方向的各向异性的变化的快慢程度； γ 是表示横波分裂强度或者横波各向异性强度的参数， γ 越大，表示介质中的横波各向异性强度越强，当 $\gamma=0$ 时，表明介质中的横波没有各向异性，而在一般情况下， ε 和 γ 是共增减的，其单调性一致，可同时增减或同时为零。

Thomsen (1986) 归纳了常见的一些岩体的各向异性统计参数结果。总结了已经公开的所测得岩土的各向异性参数和其他相关参数，结果表明大部分的岩体具有小到中等程度的各向异性。

Alkhalifah 与 Tsvankin 为了表示纵波各向异性参数引入了 η 参数：

$$\eta = \frac{\varepsilon - \delta}{1 + 2\delta} \quad (3.33)$$

Li Xiangyang(2005)为了表示转换波的各向异性参数引入了 x 参数：

$$x = \eta(\gamma_0 - 1)\gamma_{eff}^2 \quad (3.34)$$

$$\text{其中, } \gamma_0 = v_{p0} / v_{s0}, \gamma_{eff} = \frac{v_{p2}^2}{v_{s2}^2(1 + \gamma_0) - v_{p2}^2}$$

式中， v_{p0} ， v_{s0} 分别表示 P 波的垂向速度，S 波的垂向速度， v_{p2} ， v_{s2} 分别表示 P 波的叠加速度，S 波的叠加速度。 η ， x 两个参数是目前应用的比较广泛的描述各向异性程度的参数。

(2) 弹性系数用 Thomsen 参数表征

因为 Thomsen 参数的物理意义较为明确，于是在进行正演建立模型的时候通常会采用 Thomsen 参数，前文中可知弹性参数与 Thomsen 参数是可以相互转化的。于是根据 Thomsen 公式，可以得到 TI 介质的 5 个弹性系数 ($c_{11}, c_{13}, c_{33}, c_{55}, c_{66}$):

$$c_{11} = (1 + 2\varepsilon)c_{33} \quad (3.35)$$

$$c_{13} = \sqrt{(c_{33} - c_{55})(c_{33} + 2\delta c_{33} - 2c_{55})} - c_{55} \quad (3.36)$$

$$c_{33} = v_{p0}^2 \quad (3.37)$$

$$c_{55} = v_{s0}^2 \quad (3.38)$$

$$c_{66} = v_{s0}^2(1 + 2\gamma) \quad (3.39)$$

式中， v_{p0} 为纵波的垂向速度， v_{s0} 为横波的垂向速度。

3.2.5 Thomsen 参数表征的介质理论分析

介质的弹性性质由其弹性矩阵决定，有了弹性矩阵才能确定应力与应变之间的关系，因此只有正确的建立地震波的传播特性和介质的弹性参数之间的对应关系才能定性的分析各向异性对地震波在介质中的传播规律，才能更好的对于各向异性介质进行正演模拟及反演计算。

对于 TI 介质而言，可以利用弹性系数来表示各向异性的强度，同样可以用更加简洁的 Thomsen 参数来表示。本文采用 Thomsen 参数及速度来对于模型进行正演分析。

对于 TI 介质，其 Thomsen 参数用弹性系数来表示的方式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{p0} = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} \\ v_{s0} = \sqrt{\frac{c_{55}}{\rho}} \\ \varepsilon = \frac{c_{11} - c_{13}}{2c_{13}} \\ \delta = \frac{(c_{13} + c_{55})^2 - (c_{33} - c_{55})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{55})} \\ \gamma = \frac{c_{66} - c_{55}}{2c_{55}} \end{array} \right. \quad (3.40)$$

(1) 相速度与群速度

在各向异性介质中相速度与群速度有着一定的区别。波的相速度是指波前传播的速度，是简谐平面波解中假设的波传播的速度，可以通过解 Christoffel 方程得到，其垂直于波前面。波的群速度是指波能量的传播速度，可在一定程度上反映出波的传播动力学特性，决定了地震射线的分布。波的相速度方向是由相角方向决定，而群速度方向则由群角方向决定。介质对称轴与波矢量之间的夹角即为相角，介质对称轴与射线方向的夹角即为夹角。在各向异性介质中，相、群速度的传播方向是不一致的，大小亦不同，波在介质中传播的相速度或者群速度与其传播的方向有相对应的关系。而在各向同性介质中，相速度和群速度则有着相同的传播方向和速度值，与相角或群角无关。

各向异性介质中群角与相角的示意图如图 3.5，波矢量局部垂直于波前面，与此同时由于波矢量指向最快的相位增大的方向，因此，相速度也可称为波前面速度。从图中可知，波在各向异性介质中的传播与在各向同性介质中不一样，各向

异性介质的波前面并不为球面，其相角和群角并不相等，图中 θ 为相角， ϕ 为群角，对应的分别为相速度 $v(\theta)$ ，群速度 $v(\phi)$ 。

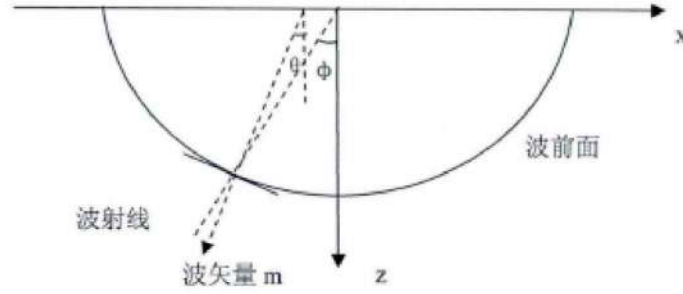


图 3.5 相角群角示意图

在平面波中，相速度定义为 $v = \frac{\omega}{k}$ ，其中 ω 是角频率， k 是波数。

此时取 $\bar{k} = k(\sin \theta \hat{x}_1 + \cos \theta \hat{x}_3)$ ，则此时的相速度可以表示为：

$$v(\theta) = \frac{\omega}{k} (\sin \theta \hat{x}_1 + \cos \theta \hat{x}_3) \quad (3.40)$$

上式中 \hat{x}_1 是 X 轴的单位向量， \hat{x}_3 是 Z 轴的单位向量。

在实际的工程勘探中，从检波器上收集的为群速度，故此时可以把群速度定义为 $V(\phi) = \frac{d\omega}{dk}$ 或利用相速度来进行定义：

$$V(\phi) = (v \sin \theta + \frac{dv}{d\theta} \cos \theta) \hat{x}_1 + (v \cos \theta - \frac{dv}{d\theta} \sin \theta) \hat{x}_3 \quad (3.42)$$

从图 3.5 中可得：

$$V(\theta) = V(\phi) \cos(\phi - \theta) \quad (3.43)$$

$$\tan(\phi - \theta) = \frac{1}{v(\theta)} \frac{dv(\theta)}{d\theta} \quad (3.44)$$

$$V^2(\phi) = v^2(\theta) + \left(\frac{dv}{d\theta}\right)^2 \quad (3.45)$$

把式 (3.44) 利用三角关系进行化简得群相角关系：

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\tan(\theta) + \frac{1}{v(\theta)} \frac{dv(\theta)}{d\theta}}{1 - \frac{1}{v(\theta)} \frac{dv(\theta)}{d\theta} \tan(\theta)} \right] \quad (3.46)$$

Sena (1992) 年给出了弱各向异性 TI 介质中的群速度与群角之间的近似关系式：

$$V(\phi) = (\sqrt{a_0 + a_1 \sin^2 \phi + a_2 \sin^4 \phi})^{-1} \quad (3.47)$$

上式是一个宽泛的公式

对于 P 波而言： $a_0 = \alpha_0^{-2}, a_1 = -2\delta\alpha_0^{-2}, a_2 = 2(\delta - \varepsilon)\alpha_0^{-2}$

对于 SV 波而言： $a_0 = \beta_0^{-2}, a_1 = 2\beta_0^{-2}(\frac{\alpha_0}{\beta_0})^{-2}(\delta - \varepsilon), a_2 = -\alpha_1$

对于 SH 波而言： $a_0 = \beta_0^{-2}, a_1 = -2\gamma\beta_0^{-2}, a_2 = 0$

把上述参数代入式 (3.47) 则可得到群速度的具体表达式：

对于 P 波：

$$v_p^{-2}(\phi) = \alpha_0^{-2} - 2\delta\alpha_0^{-2} \sin^2 \phi + 2(\delta - \varepsilon)\alpha_0^{-2} \sin^4 \phi \quad (3.48)$$

对于 SV 波：

$$v_{sv}^{-2}(\phi) = \beta_0^{-2} + \frac{1}{2}\beta_0^{-2}(\frac{\alpha_0}{\beta_0})^{-2}(\delta - \varepsilon) \sin^2 2\phi \quad (3.49)$$

对于 SH 波：

$$v_{sh}^{-2}(\phi) = \beta_0^{-2} - 2\gamma\beta_0^{-2} \sin^2 \phi \quad (3.50)$$

上述式中， $\alpha_0, \beta_0, \delta, \varepsilon, \gamma$ 为 Thomsen 参数。

Hron 与 Daley 给出了横观各向同性介质下的 P 波，SV 波，SH 波情况下的地震波相速度公式，而 Thomsen 将公式进行了一定的简化，得到了弱各向异性介质中的 PP 波与 PSV 波的相速度表达式：

$$v_p(\theta) = v_{p0}(1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta) \quad (3.51)$$

$$v_{sv}(\theta) = v_{s0} \left[1 + \frac{v_{p0}^2}{v_{s0}^2} (\varepsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right] \quad (3.52)$$

$$v_{SH}(\theta) = v_{s0}(1 + \gamma \sin^2 \theta) \quad (3.53)$$

从式 (3.51) 看出，P 波的速度是由各向异性参数 ε, δ 来决定。

当垂直入射时， $\theta=0^0$ ， $v_p(0) = v_{p0}$

当水平入射时 $\theta=90^0$ ， $v_p(90^0) = v_{p0}(1 + \varepsilon)$

则可得：

$$\varepsilon = \frac{v_p(90^0) - v_p(0^0)}{v_p(0^0)} \quad (3.54)$$

分析可得当入射角为零时，P 波相速度与各向异性参数 $\varepsilon, \delta, \gamma$ 无关。当入射角为 90^0 时，P 波的相速度则只与 ε 有关。

对 P 波及 SV 波的相速度求导可得：

$$\frac{dv_p}{d\theta} = v_{p0} \sin 2\theta (\delta \cos 2\theta + 2\varepsilon \sin^2 \theta) \quad (3.55)$$

$$\frac{dv_{sv}}{d\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{p0}}{v_{s0}} \right)^2 (\varepsilon - \delta) v_{sv0} \sin 4\theta \quad (3.56)$$

从群速度与相速度的表达式中可以看出，群角只是群速度的一个量，它可以标定群速度，但群速度不一定是与群角相关的函数，而相速度是相角的函数。

(2) 相角与群角

如图 3.5 可知相角与群角之间存在一定的关系，Thomsen 在研究弱各向异性介质时给出了相角与群角之间的关系，可以用相角来表示群角，其公式如下：

$$\tan \phi = \tan \theta \left[1 + \frac{1}{\sin \theta \cos \theta} \frac{1}{v(\theta)} \frac{dv}{d\theta} \right] \quad (3.57)$$

P 波、SV 波、SH 波的表达式分别如下：

$$\tan \phi_p = \tan \theta_p \left[1 + 2\delta + 4(\varepsilon - \delta) \sin^2 \theta_p \right] \quad (3.58)$$

$$\tan \phi_{sv} = \tan \theta_{sv} \left[1 + 2 \frac{\alpha_0^2}{\beta_0^2} (\varepsilon - \delta) (1 - \sin^2 \theta_{sv}) \right] \quad (3.59)$$

$$\tan \phi_{SH} = \tan \theta_{SH} (1 + 2\gamma) \quad (3.60)$$

式中， θ 为相角， ϕ 为群角， $\alpha_0, \beta_0, \delta, \varepsilon, \gamma$ 为 Thomsen 参数。

(3) 反射与透射

波遇到两种介质的分界面，就发生反射和透射，TI 介质的反射和透射遵循 Snell 定律，地震波在介质中传播的时候会产生反射波、透射波、入射波（如图 3.6），故对于 TI 介质同样适用，故根据 Snell 定律可以给出这三种波内部关系的表达式：

$$\frac{\sin \alpha_1}{v(\theta_1)} = \frac{\sin \alpha_2}{v(\theta_2)} = \frac{\sin \alpha_3}{v(\theta_3)} = P \quad (3.61)$$

式中， $v(\theta_1)$ ， $v(\theta_2)$ ， $v(\theta_3)$ 分别表示入射、反射、透射时的相速度 α_1 ， α_2 ， α_3 ，为入射角、反射角、透射角， P 为射线常数。

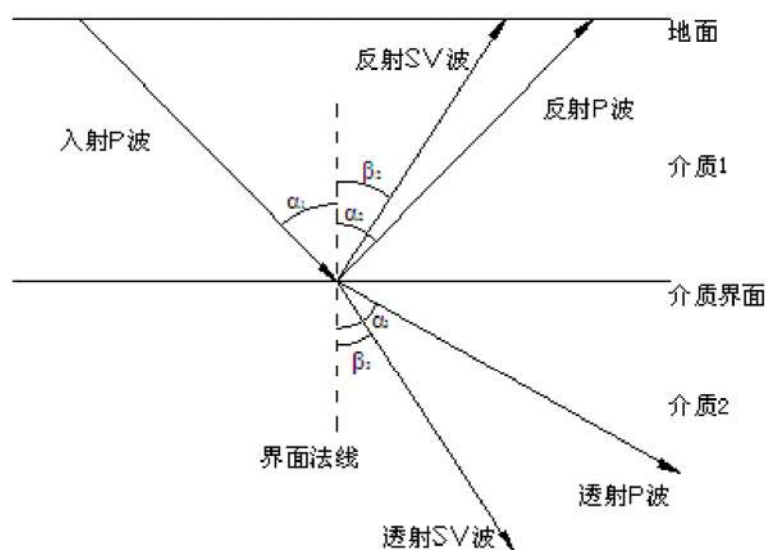


图 3.6 TI 介质反射透射图

3.3 改进后的最短路径算法

3.3.1 最短路径算法

最短路径算法是由 Nakanishi et al 最早提出的，接下来 Moser^[14]对于这个方法进行了更为全面的研究。最短路径射线追踪方法即 SPR 源于网格理论及惠更斯原理，主要是在所测断面上划分节点，并采用弧线连接构成相应的网络，使每个节点与其相邻节点均有联系，从震源开始到每个节点的连线构成射线簇，在射线簇中寻找路径最短的节点连线。以每个刚传到的节点为新的震源继续向前传播，是能量不断的扩散，不断的向四周扩展。同时计算每个小单元内部的任意两个节点的射线走时，利用费马原理中的走时最短法来确定该射线路径的最小走时及其相应的最短路径，把这些单元内的最短路径进行连接就可以找出从震源点到接收点的最小走时及最短射线路径。此方法具有无条件稳定性，不受模型维数与复杂程度的限制。然而，其精度在很大程度上取决于网格的疏密程度，当网格节点比较稀疏的时候，此时会由于稀疏的空间及方向的离散使得走时与路径位置产生较大的误差，当网格节点比较密的时候，能提高相应的精度，但是却给计算带来了很大的困扰，加大了计算难度，降低了运算效率。

3.3.2 改进后的最短路径算法

在进行射线追踪正演的过程中运用的比较成熟的即为改进后的最短路径射线追踪算法，这种算法由白超英首次提出。该方法的核心即为引入主节点与次级节点，这样增加了网格的合理性，且更加适合与复杂介质的计算。改进后的最短路径算法有一些优点：1、在同样精度的前提下，可以减少模型单元的数量及网格节

点；2、相比常规算法计算时间缩短；且在实际中已经用于复杂介质的多次波追踪。

目前运用的最好的最短路径求解方法是由 F.W.Dijkstra 提出的标号法。其主要特点即为标号，将网格中的节点进行相应的标号划分，可以分为三个部分：最短路径节点、临时标记节点、未标记节点。在计算开始时可以假定震源点为最初的最短路径节点，其余的均视为未标记节点，在算法的执行过程中，命令扩展都是由最短路径节点开始往相邻的节点扩展，此时对于相邻节点进行判断，如果是最短路径节点则标记为最短路径节点，不是的则标记为临时节点，等权值进行更新后，以新的最短路径节点作为新的波源往外进行扩展，一直重复此步骤哦，当所有节点都经历过此步骤后则计算结束。具有的算法可以按如下描述：在一非负权值简单连通无向图 $G=[V,E,W]$ (V : 顶点集, E : 边集, W : 边权值) 中, D 为图 G 的邻接矩阵, 求源点 P_0 到剩下所有节点 $P_{(i)}$ 的最短路径长度。

①将 V 分为未标记节点子集 N 、临时最短路径节点子集 T 和最短路径节点子集 S , 每个节点上的路径权值为 $D_{(i)}$, 初始化: $S=P_0$, $T=\varnothing$, $N=V-C$, $D_{(0)}=0$, $D_{(i)}=\infty$;

②更新: 将新加入 S 集合的节点 $P_{(s)}$ 作为扩展源, 计算从扩展源到相邻节点的路径值。若该值比原值小, 则替换原值, 否则保持原值不变, 将相邻节点之中的未标记节点归为临时标记节点, 即 $T=T \cup P_{(i)}$, $N=N-P_{(i)}$;

③选择: 在 T 中选择具有最小路径值 $D_{(s)}$ 的节点 $P_{(s)}$, 归入集合 S 中, 即 $S=S \cup P_{(s)}$, $T=T-P_{(s)}$;

④迭代判断: 若 $T=\varnothing$ 算法结束, 否则转②。

上述算法的总共迭代次数为 $n-1$ 次,, 而在每次迭代的过程中均会新加一个节点到所谓的临时节点集中去, 在第 i 次迭代时不在临时节点集合中的节点数为 $n-i$, 此时第 i 次迭代应对 $n-i$ 个节点进行相应的处理, 此时的处理数为 $n-i$, 则总的节点

网格的处理时间复杂度 $\sum_{i=1}^{n-1} (n-i) = \frac{n(n-1)}{2}$ 是 $O(n^2)$ 。

3.4 反射波的模拟

3.4.1 模型参数化及速度界面离散化

模型参数化方式在正演模拟和层析反演中起着很大非常重要的作用, 甚至可以说层析反演结果的优劣在很大程度上是取决于模型参数化方式。

通常来说, 模型参数化一般采用三种模型: 像素模型、拟合函数模型和均匀速度模型。其中最为精确的即为像素化模型, 其参数化效果最为突出, 但参数

化方式过细，对于正演及层析成像均增加了难度；拟合函数模型则属于中间位置，其对于介质描述的精度及反演的难度方面均较为一般；而均匀速度模型亦称为块体模型、宏观模型，此模型较为粗糙，很难完整的表述介质的情况。

本文的参数化方法主要采用像素模型参数化，其将待测剖面离散成二维均一的矩形网格。网格的划分均一化有利于计算的便捷性，矩形化则有利于在计算中坐标系统的参照，利于网格间的相互搜索。此时给点某个区域的起始坐标垂向网格间距、横向网格间距、垂向网格数目、横向网格数目等，则可以根据上述这些信息求出区域内任意一点的坐标值，且还可以定位该点网格位置。

假定成像的单元很小（趋于零）时，此时可认为每个单元的慢度 $S(x,y)$ 为一确定的值 S_i ，则可将成像区域及式（3.12）进行离散化，可写成级数形式：

$$t_j = \sum_{i=1}^N a_{ji} \cdot S_i \quad (3.62)$$

式中， S_i 是第 i 个离散单元内的平均慢度， $a_{(j,i)}$ 是第 j 条射线在第 i 个单元内的长度， t_j 是第 j 条射线走时， N 是离散单元个数。

把上式积分形式进行展开，可以得到：

$$\begin{cases} t_1 = a_{11}S_1 + a_{12}S_2 + \cdots + a_{1n}S_n \\ t_2 = a_{21}S_1 + a_{22}S_2 + \cdots + a_{2n}S_n \\ \vdots \\ t_m = a_{m1}S_1 + a_{m2}S_2 + \cdots + a_{mn}S_n \end{cases} \quad (3.63)$$

再将上式进行简化可以得到：

$$AS = T \quad (3.64)$$

式中， A 为 JACOBI 矩阵，是一个 $M \times N$ 阶矩阵，其中的元素为 a_{ji} ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$)，为第 i 个单元慢度 S_i (模型参数) 对第 j 个走时 t_j (观测值) 的贡献量，在最短射线路径确定后， $a_{(j,i)}$ 为第 i 条射线在第 j 单元中的长度； $T = (t_1, t_2, \dots, t_M)$ ， T 是各射线走时 (观测值向量)； M 是射线根数， N 是速度网格单元个数。

速度模型离散化也是引入插值思想，对于原有模块进行划分，便于计算，但是在离散的过程中部分地质特征可能被覆盖，故选择合适的尺寸对于计算来说更为重要，单元尺度的选取依赖于实际资料的精度、观测系统的限制、反演未知数与射线条数的匹配程度等。其次为输入发射点及接收点坐标，在离散化的过程中，把主节点定义在单元角节点上，在每两个主节点之间插入 9 个次级节点，这样就完成了网格内部的细化。

3.4.2 射线追踪

为了利用波前法的优点，在反射波射线追踪时，可以采用以下步骤进行：1、利用最短路径射线追踪原理，求出震源点到反射界面任意点的初至时间；2、将检波器点作为震源，同样利用最短路径射线追踪求出检波器点到反射界面上任意点上的初至时间；3、将上述两步计算出的反射界面点的初至时间相加，得到界面点上的总旅行时；4、做出界面点上的总旅行时与反射界面点的水平坐标关系曲线，按费马原理，震源到接收点的旅行时是稳定的。因此，曲线上的极值点对应的旅行时即为反射波的旅行时，相对应的界面水平坐标值即为反射点的水平坐标。于是，界面上的反射点及反射波旅行时便可准确的求出；5、已知反射点的位置，分别由震源计算得到时间和将接收点作为震源计算出的时间相加即为路径走时，确定震源到反射点及接收点到反射点的射线路径。

3.5 本章小结

本章通过总结堤坝介质的反射波正演理论，针对各向同性与横观各向同性两种介质模型，研究了堤坝的反射波正演方法，分析了正演最短路径的射线追踪方法。主要结论如下：

- 1、最短路径算法灵活稳定，在对其进行改进（主节点内部插入次级节点）后计算精度得到了提升；
- 2、结合了最短路径的射线追踪技术具有计算速度快、分辨率高、收敛稳定等特点，是当前波动研究中比较流行的算法；
- 3、横观各向同性介质相比理想化的各向同性介质而言与工程实际介质更为吻合，对于其的研究有助于更好的对于堤坝隐患进行探测；
- 4、Thomsen 参数有助于更好的对于横观各向同性介质的弹性本构方程进行分析，可以更加便捷的对于弹性系数进行表征及计算。

第四章 堤坝反射波成像反演分析及软件编制与实现

地震数据主要包括两个信息源，分别是地震波走时和地震波波形。众所周知，虽然地震走时层析成像有一些不足，但是用地震波波形进行层析成像的难度更大，且对地震资料的要求更为苛刻，抗干扰性能差；相比之下，地震波走时层析成像因其本身的优点逐渐地被人们应用于地震勘探中。

4.1 各向同性介质反射波反演方法

4.1.1 线性方程组的求解

波速成像的反演算法的主要研究对象为方程 (3.64) 及其产生的 JACOBI 矩阵 A ，此时若旅行时向量 t 给出，且系数矩阵 A 也已知，则可以利用线性方程组求出慢速 S 的具体解，然而在实际过程中却并没有这么理想，由于很多客观的因素很难全方位的观测到走时，同时系数矩阵 A 也是未知的，因此一般情况下是利用迭代的方法来求解慢度 S 的。具体迭代过程可归纳如下：

- (1) 从检波器的地震记录上拾取所需波的具体走时，视为观测走时 $T_{\text{观测}}$ ；
- (2) 结合通过实际情况所得到的部分信息，给定一个初始的慢度模型 S ；
- (3) 利用最短路径射线追踪方法来计算相应波形的理论走时 $T_{\text{理论}}$ 及路径；
- (4) 计算理论走时 $T_{\text{理论}}$ 与实际观测走时 $T_{\text{观测}}$ 的残差 $\Delta T = T_{\text{观测}} - T_{\text{理论}}$ ，若走时残差大于给定的误差精度或者迭代次数小于设定的最大迭代次数，则对模型进行修改继续迭代；
- (5) 重复步骤 (3)、(4) 直到走时残差小于给定的精度误差或者迭代次数大于给定的最大迭代次数，结束。

4.1.2 最小二乘正交分解法(LSQR)

常见的求解线性方程组的方法比较多，主要包括：SIRT 算法（联合迭代重建算法）、ART 算法（代数重建算法）、SVD 算法（奇异值分解法）、CG 算法（共轭梯度法）、LSQR（最小二乘正交分解法），各种算法均有其相应的特点及使用范围，故在采用具体的反演算法过程中需要考虑问题的稳定性、计算精度、规模、发展程度等等一些相应的要求，本文根据各向同性介质的线性方程组，选用最小二乘正交分解法进行计算，该法具有收敛迅速稳定的特点，在近年的地震层析反演成像技术中应用的比较广泛。

最小二乘正交分解法 (LSQR) 是基于 LANCZOS 方法（矩阵的双对角化）的思想，从而将最小二乘法、正交分解法及 LANCZOS 投影方法结合起来的一种求

解大型稀疏矩阵方程组的算法，以下简要概述这一方法的过程。

反演的主要目标就是求解线性方程组 $Ax=b$ ，其中 A 是 I 行 J 列的系数矩阵，具体的表示为 $A=A_{i \times j}$ ，其中 $x \in R^J$ ， $b \in R^I$ 。

因利用 Lanczos 方法求解的线性方程组的系数矩阵需要是具有对称性的方阵，因此在求解之前需要对系数矩阵进行转化处理，之后才能利用 Lanczos 求解方程。

首先构造线性方程组系数矩阵对应的具有对称性的矩阵：

$$\begin{bmatrix} 0_{I \times I} & A_{I \times J} \\ A_{J \times I}^T & 0_{J \times J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0_{I \times 1} \\ x_{J \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0_{J \times 1} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

此时利用 Lanczos 方法中的递推构造标准正交向量列 w_i 和单调子空间列的方法用于上式 (4.1)，递推到第 $2m$ 步时，可得标准正交向量列 w_i ($i=1,2,\dots,2m$) 和其相对应的 W_{2m} 和 T_{2m} 分别为：

$$w_{2k-1} = \begin{pmatrix} u_k \\ 0 \end{pmatrix}, w_{2k} = \begin{pmatrix} 0 \\ v_k \end{pmatrix} (k=1,2,\dots,m) \quad (4.2)$$

$$W_{2m} = \begin{bmatrix} u_1 & 0 & \dots & u_m & 0 \\ 0 & v_1 & \dots & 0 & v_m \end{bmatrix}_{(I+J) \times 2m} \quad (4.3)$$

$$T_{2m} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_1 & 0 & \beta_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_m & 0 \end{bmatrix}_{2m \times 2m} \quad (4.4)$$

其中， $u_i \in R^I, v_i \in R^J$ ($i=1,2,\dots,m$), $u_i, v_i, \alpha_i, \beta_i$ ($i=1,2,\dots$) 则满足如下的递推公式

$$\begin{cases} v_0, \beta_1 = \|b\|, u_1 = \frac{b}{\beta_1}, \text{当 } i=1,2,\dots \text{ 时,} \\ \alpha_i = \|A^T u_i - \beta_i v_{i-1}\|, v_i = (A^T u_i - \beta_i v_{i-1}) / \alpha_i \\ \beta_{i+1} = \|A v_i - \alpha_i u_i\|, u_{i+1} = (A v_i - \alpha_i u_i) / \beta_{i+1} \\ \text{当 } \alpha_i = 0 \text{ 或 } \beta_{m+1} = 0 \text{ 时, 停止} \end{cases} \quad (4.5)$$

此时，其中的子空间 $W^{(2m)} = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} u_m \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ v_m \end{pmatrix} \right\} \subseteq R^{I+J}$ 。

于是方程组 (4.1) 在子空间 $W^{(2m)}$ 的投影的近似解的形式为：

$$x_{2m} = W_{2m}(z_1, y_1, \dots, z_m, y_m)^T = \begin{pmatrix} z_1 u_1 + z_2 u_2 + \dots + z_m u_m \\ y_1 v_1 + y_2 v_2 + \dots + y_m v_m \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

与此同时, $(z_1, y_1, \dots, z_m, y_m)$ 满足方程 $T_{2m}(z_1, y_1, \dots, z_m, y_m)^T = W_{2m}^T \begin{pmatrix} b \\ 0 \end{pmatrix}$

此时可以讲近似的下 X_{2m} 代入方程组 $AX = b$ 得:

$$\begin{pmatrix} A(y_1 v_1 + y_2 v_2 + \dots + y_m v_m) \\ A^T(z_1 u_1 + z_2 u_2 + \dots + z_m u_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ 0_{J \times I} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

转化下为:

$$\begin{cases} A(y_1 v_1 + y_2 v_2 + \dots + y_m v_m) \cong b \\ A^T(z_1 u_1 + z_2 u_2 + \dots + z_m u_m) \cong 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

记 $V_m = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_m]_{J \times m}$, $U_m = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]_{I \times m}$, 令

$$B_m = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \beta_2 & \alpha_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_3 & \alpha_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_m & \alpha_m \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \beta_{m+1} \end{bmatrix}_{(m+1) \times m} \quad (4.9)$$

$V^{(m)} = \text{span}\{v_1 \ v_2 \ \dots \ v_m\}$, 此时根据 $w_i (i=1, 2, \dots, 2m)$ 的标准正交性得:

$$U_m^T U_m = V_m^T V_m = I \quad (4.10)$$

此时据 (4.5) 得:

$$U_{m+1}(\beta_1 e_1) = b, AV_m = U_{m+1} B_m, A^T U_{m+1} = V_m B_m^T + \alpha_{m+1} v_{m+1} e_{m+1}^T \quad (4.11)$$

式中, $e_1 = (1, 0, \dots, 0)^T \in R^{m+1}$, $e_{m+1}^T = (0, \dots, 0, 1) \in R^{m+1}$

经式 (4.10) 得:

$$A = U_{m+1} B_m V_m^T, \quad U_{m+1}^T A V_m = B_m \quad (4.12)$$

$$\text{记 } Y_m = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, X_m = V_m Y_m \in V^{(m)} \quad (4.13)$$

根据上式, 要求 X_m , 先求 Y_m , 利用正交分解法求解得到 Y_m , 到利用此方法较为复杂, 利用最小二乘法则比较简单。

求解 $AX=b$, $x \in R^I$ 的最小二乘问题, 可以转化为:

$$\|Ax - b\|_2 = \min \{ \|Av - b\|_2, v \in R^I \} \quad (4.14)$$

此时要求线性方程组在 $V^{(m)}$ 的近似解 X_m ，可将问题限制在子空间 $V^{(m)}$ 内，将最小二乘问题简化为求 $X_m \in V^{(m)}$ ，得：

$$\|AX_m - b\|_2 = \min \{ \|Av - b\|_2, v \in V^{(m)} \} \quad (4.15)$$

根据式 (4.9)、(4.10)、(4.11) 及 $X_m = V_m Y_m \in V^{(m)}$ 得：

$$\|AX_m - b\|_2 = \|U_{m+1} B_m V_m^T V_m Y_m - U_{m+1} (\beta_1 e_1)\| = \|U_{m+1} (B_m Y_m - \beta_1 e_1)\| = \|(B_m Y_m - \beta_1 e_1)\| \quad (4.16)$$

之前求 $\|AX_m - b\|_2$ 取极小值的问题为求 $Y_m \in R^m$ ，使得 $\|(B_m Y_m - \beta_1 e_1)\|$ 取得极值，将

求解 X_m 的问题转化为求解方程 $B_m Y_m - \beta_1 e_1$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \beta_2 & \alpha_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_3 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \beta_m & \alpha_m \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \beta_{m+1} \end{bmatrix}_{(m+1) \times m} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_{m-1} \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

因 B_m 是下双对角矩阵，故可先用正交分解法求解上述方程组得到 Y_m ，然后根据 (4.13) 计算现象方程组在 $V^{(m)}$ 中的近似解 X_m 。求解最小二乘正交分解问题 $\min \|(B_m Y_m - \beta_1 e_1)\|$ ，下列给出具体操作步骤：

1) 初始化。

$$\begin{cases} \beta_1 u_1 = b_1 \\ \alpha_1 v_1 = A^T u_1 \\ \omega_1 = v_1 \\ x_0 = 0 \\ \bar{\varphi}_1 = \beta_1 \\ \bar{\rho}_1 = \alpha_1 \end{cases} \quad (4.18)$$

其中 b_1 、 u_1 为 m 维向量， w_1 、 x_0 为 n 维向量， $\bar{\varphi}_1$ 、 $\bar{\rho}_1$ 、 α_1 、 β_1 为实数。

对 $i=1, 2, \dots$ 做以下各步。

2) 双对角化矩阵

$$\begin{cases} \beta_{i+1} u_{i+1} = A u_i - \alpha_i u_i \\ \alpha_{i+1} v_{i+1} = A^T u_{i+1} - \beta_{i+1} v \end{cases} \quad (4.19)$$

3) 修改参数。

$$\begin{cases} \rho_i = (\bar{\rho}_i + \beta_{i+1}^2)^{1/2} \\ c_i = \bar{\rho}_i / \rho_i \\ s_i = \beta_{i+1} / \rho_i \\ \theta_{i+1} = s_i \alpha_{i+1} \\ \bar{\rho}_i = -c_i \alpha_{i+1} \\ \varphi_i = c_i \bar{\varphi} \\ \bar{\varphi}_{i+1} = s_i \bar{\varphi}_{i+1} \end{cases} \quad (4.20)$$

4) 迭代求解

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + (\varphi_i / \rho_i) \\ \omega_{i+1} = v_{i+1} - (\theta_{i+1} / \rho_i) \end{cases} \quad (4.21)$$

5) 收敛判断：当迭代次数增加时，所求解没有明显的变化即可停止迭代。

4.1.3 迭代收敛准则

LSQR 作为一种迭代算子，有其相应的迭代停止准则，主要由以下几种：

(1) 设定最大的迭代次数。主要作用是保护计算的实效性，计算过程中，迭代次数的设置均不可超过模型参数的数量，随着特征值的找到，迭代次数已经不再是关键，故在一般情况下迭代次数的设置为模型参量数目的 2/3，在通常情况下迭代次数设置十次即可满足要求；

(2) 设定系统条件数。经过每次迭代后都会产生新的特征值，故系统的条件数是随着迭代次数的增加而增加的，如果设定条件数则可以对于特征值频谱进行截断。此迭代准则相对较为合理，在使用中无需判断要从哪个特征值开始忽略，但是求取系统条件数较为困难。

(3) 数值精度 ε 。深度精度要求在第 m 次迭代后得到 S_m ，此时若满足 $\|AS_m - T\| < \varepsilon$ ，则可视为该解满足精度要求，迭代停止，其中数值精度是对于暑假 T 的精度估计，但是该值不能超过计算精度，利用该准则可以较为精确的得到一个较好的结果。

4.2 TI 介质反射波反演方法

4.2.1 非线性反演方法

非线性反演方法因其算法的特点及适用问题的不同，可分为全局最优算法和局部最优算法。其中全局最优算法包括：穷举法、禁忌搜索算法、蒙特卡洛法、模拟退火法、人工神经网络法、遗传算法、随机爬山法和拉格朗日松弛算法等。这些算法都是借鉴了人工智能、生物进化、数理科学及神经系统等思想，能够解

决一些复杂的最优化问题或非线性反演问题。其优点为：可以在整个模型空间搜索，不会陷入局部极值，不依赖于初始值，在一定的限定条件下寻求到全局最优解。缺点为：给定的最优解为限定条件下的最优解，不一定为全局最优解，收敛速度较慢，计算相对复杂。局部最优算法主要是从某一个初始点开始，利用目标函数的梯度计其他信息来构造搜索方向，再选择适当的步长，产生一个使目标函数接近的新点，从新点出发进一步逼近，重复迭代从而得到最优解，其方法主要包括：牛顿法、最速下降法、步长加速法、可行方向法、共轭方向与共轭梯度法等。其优点为：收敛速度快、算法简单。缺点为：解严重依赖于所给初值，容易陷入局部极值，只有在给出的初始猜测值位于全局最优解的相关域内才可能得到全局最优解。

本节中在全局算法与局部算法中各选一种有代表性的算法进行阐述。

(1) 遗传算法

遗传算法属于一种蒙特卡洛反演算法，主要是基于生物系统的自然遗传及选择机制得到的算法，但它不是一种盲目的随机搜索方法，主要解决大尺度及多变量非线性反演问题，主要是对于群体进行搜索及追踪。利用类生物遗传中染色体遗传基因变换来改变模型参数。

遗传算法的核心是选择、交换、变异三步组成的转移过程。在转移过程中的细节变换非常的多，故会产生很多算法的变种，但其目标还是一致的，算法的流程大致为：

- ①参数编码，主要是对于模型参数进行二进制编码工作；
- ②初始模型群体的产生，初始模型群里是随机产生的，其个体在空间分布的越均匀越好，故模型群里越大则覆盖面越广，但负面影响就是计算量的增大；
- ③选择，为产生新群体模型的第一步，主要是从群体中选择模型进行配的交流，选择适宜值的大小与对应的目标函数；
- ④交换，选择亲本之后即可进入交换，属于繁殖的过程，主要体现在亲本模型的重组；
- ⑤变异，类似于生物遗传学中基因变异原理，在亲本的后代中总会有一个或者几个进行随机的摄动，从而产生变异，变异在遗传过程中也是非常重要的一环，在非线性的反演过程中，变异可以使得模型空间的搜索进行的更加彻底。
- ⑥更新，在经历过交换和变异后可以产生出新的子本模型，相对于生物的进化总会出现死亡与更替，这样是为了群体的和谐发展，在算法中也是一样的原理，如果没有更替的群体则会一直变大，这是现实中不可容忍的，这时就显现出了更替的重要性；
- ⑦收敛，在群体模型经过多次的选择、交换和变异之后，群体的大小是不会

变化的，但目标函数则会逐渐增大，直到限定于目标函数要求的区域内，此时可判断算法收敛。

(2) 共轭梯度算法

作为一种经典算法，主要用于求解非线性最优化问题，可以求得非线性问题的精确解，同时还有二次截止的性质，具有快速高效等特点，但如果极值有多个，则会陷入局部极值解。

求解无约束非线性反演问题： $\min_{x \in R^n} f(x)$

根据局部最优算法流程，给定初始值 x_0 ，然后在每步迭代时选择一个下降的方向 d_k ，按下式进行迭代得到 x_1, x_2, \dots, x_k ：

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (4.22)$$

于是在经过 n 次计算后可得到上式的解，其迭代方向为 d_k ，算法的不同取决于 d_k 的取值。

基本流程为：

①给定初始值 $x_0 \in R^n, \varepsilon \geq 0$ ； $d_0 = -g_0$ ， $k=0$ ；

②利用某种算法进行一维线性搜索，得到合适的 α_k ； $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ ，此时如果 $\|x_{k+1} - x_k\| \leq \varepsilon$ ，则可视为计算停止，否则继续进入第三步进行计算；

③利用公式计算参数 β_{k+1} ； $d_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_{k+1} d_k$ ； $k=k+1$ ；转入第二步。

4.2.2 联合反演方法

上述的两类算法均有其相应的局限性，如果把这两种算法的有点结合起来，则可获得更好的反演效果，其反演结果既可以快速的收敛又不会陷入局部极值的误区中，已有很多学者在这一块进行了尝试，如采用遗传算法与共轭梯度法的结合，遗传算法与神经网络的结合，共轭梯度算法与神经网络的结合，随机爬山法与共轭梯度算法的结合等待联合算法，随着学科的发展，会有更多更好的混合解法得到运用。

4.3 各向同性下的反射波软件编制及实现

4.3.1 正演模拟程序的编制及实现

正演模拟的程序采用 fortran 语言编制而成，利用最短路径射线追踪原理进行计算，其流程图如图 4.1：

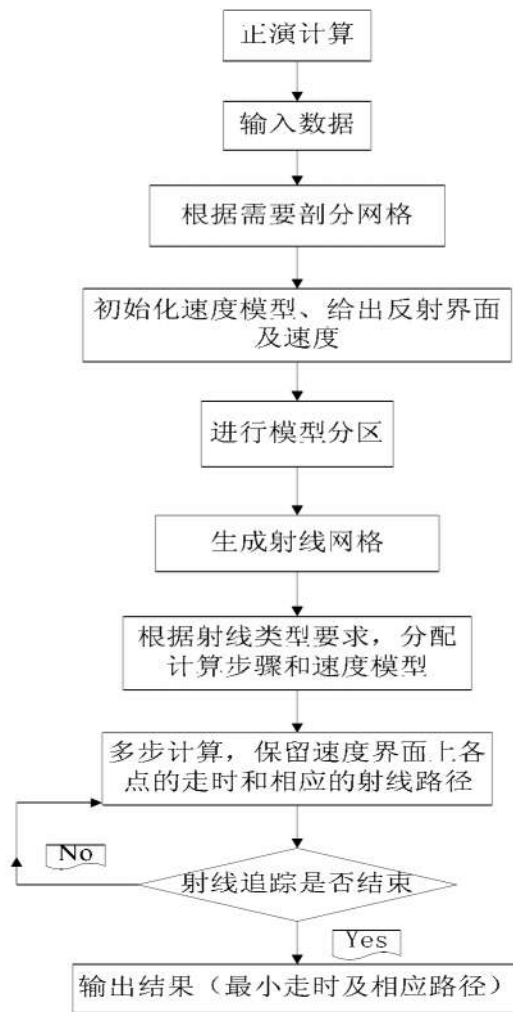


图 4.1 正演模拟流程图

(1) 数据文件的输入

数据文件包括网格数据文件、速度参数文件、界面坐标及发射点接收点文件等。

网格数据文件主要包括模型的参数，如长度 X_{MIN} 、 X_{MAX} 及深度 Z_{MIN} 、 Z_{MAX} ，网格划分的大小， X 方向的划分尺寸 DX 、 Z 方向的划分尺寸 DZ ，主节点内部次级节点插值个数 $NSCALE$ ，输入这些参数后即可完成网格的划分，为后面的速度网格赋值打下了基础。

速度参数文件主要是节点速度的赋值，在输入文件中输入每个主节点对应的地震波速度 $V(i)$ ，次级节点速度则通过内插法进行计算。此步完成了网格节点的速度赋值。

在完成了网格的剖分及网格单元节点的速度赋值后，定义反射界面的个数 N 及其界面坐标点 (X_i, Z_i) 。

在完成上述步骤后，定义炮点的个数 NS 及每个炮点的坐标值 (X_i, Z_i) ，定义检

波器点的个数 NR 及每个检波器点的坐标值(X_i, Z_i), 定义炮点与检波器点之间的波形特征。

(2) 数据文件的输出

利用最短路径射线追踪算法可以得到的两种输出参数: 射线路径(RAY TRACE)和相对应的走时(TRAVEL TIME)。根据最短路径射线追踪, 在设定输出参数时定义输出的路径为走时最短路径, 输出其在网格内部的坐标, 同时输出对应的节点内部走时。在得到了路径坐标参数后利用 Grapher 软件把射线路径绘制出来, 走时则利用来进行参数反演。

4.3.2 反演计算程序的编制及实现

反演计算程序采用 fortran 语言进行编制, 利用最小二乘正交分解法 (LSQR) 原理进行编制, 流程图如图 4.2,

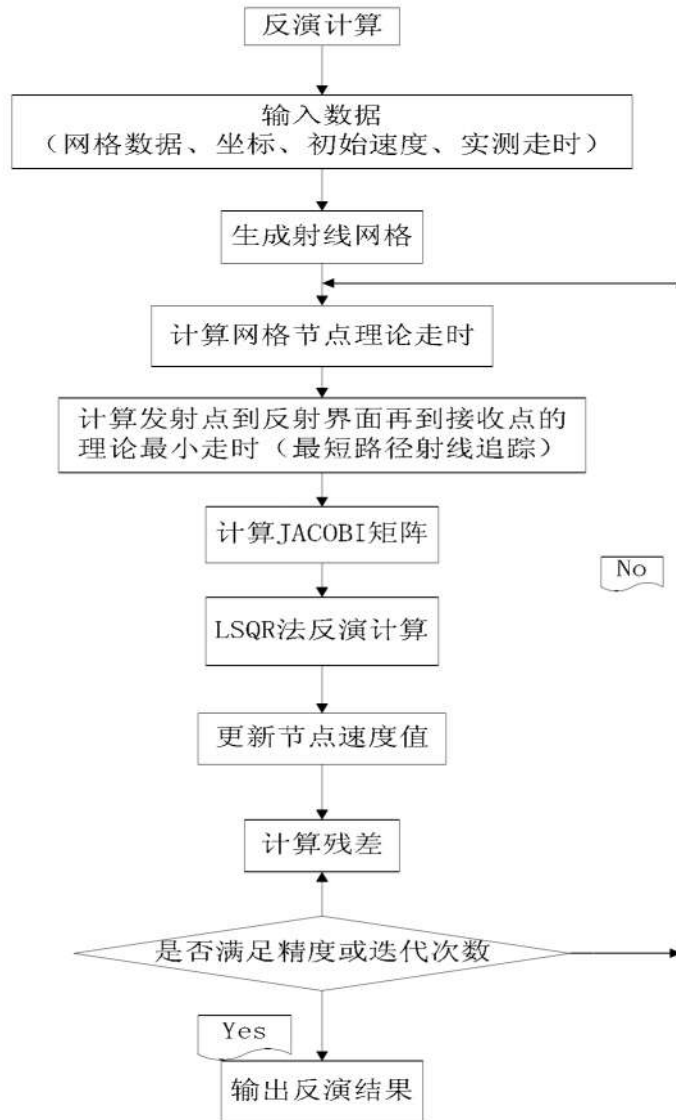


图 4.2 反演计算流程图

反演的即为利用正演模拟所得走时及路径反演出结构模型内部的速度分布。

(1) 反演数据输入文件

反演过程中的输入文件为实测走时文件(TRAVER TIME),对应的为每个发射点与接收点之间的路径(RAY TRACE),同时输入反演过程中的最大速度值(VMAX)及最小速度值(VMIN),防止不实际的速度出现,设定反演精度(PRECISION),设定最大的迭代次数(ITS)。

(2) 反演数据输出文件

经过反演计算后将会输出两个数据文件,一个是速度参数文件,对于为每个网格节点速度,这个速度参数体现了模型内部的具体速度分布情况。第二个输出文件为射线路径输出文件,其表现了在模型中从炮点发射到检波器点接收的射线的实际路径。

4.4 TI 介质下的反射波软件编制及实现

4.4.1 射线追踪的实现

均匀各向同性介质的波动参数只需两个拉梅常数即可表示,其射线追踪方式在第三章已经进行了阐述,TI 介质的波动参数则较为复杂,本节主要对于 TI 介质的射线追踪实现进行阐述。

1、射线追踪

用已知的射线路径 $R(x)$,可以计算走时沿射线路径的线积分。

$$t = \int_{R(x)} \frac{ds}{U(x, \theta_0, \mathbf{r}^0)} \quad (4.23)$$

式中, ds 表示两个节点之间的弧长, $U(x, \theta_0, \mathbf{r}^0)$ 表示模型的群速度,其中 $\mathbf{x} = (x, z)$ 。群速度 $U(x, \theta_0, \mathbf{r}^0)$ 是根据给定的 Thomsen 参数来确定的, $\mathbf{r}^0 = (\sin \theta, \cos \theta)$, 可以假定 $\mathbf{m}(\mathbf{x})$ 为给定的弹性模型量,其表达式为:

$$\mathbf{m}(\mathbf{x}) = \{a_{11}(\mathbf{x}), a_{13}(\mathbf{x}), a_{33}(\mathbf{x}), a_{55}(\mathbf{x}), a_{66}(\mathbf{x}), \theta_0(\mathbf{x})\} \quad (4.24)$$

式中, $a_{11}(\mathbf{x}), a_{13}(\mathbf{x}), a_{33}(\mathbf{x}), a_{55}(\mathbf{x}), a_{66}(\mathbf{x})$ 为弹性系数, $\theta_0(\mathbf{x})$ 为入射角。

根据最短路径射线追踪,可知两个节点 \mathbf{x}_A 和 \mathbf{x}_B 之间的走时积分可表示为:

$$t_B = \min \left\{ \int_{\mathbf{x}_A}^{\mathbf{x}_B} \frac{ds}{U(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0)}, \mathbf{x}_A \in \Omega_B \right\} \quad (4.25)$$

2、模型的参数化

根据给定的单元尺寸,可以通过式 (4.24) 得到每个网格节点的弹性模型量:

$$\{\mathbf{m}(\mathbf{x}_k), k = 1, 2, \dots, N_1, N_1 = (N_x + 1)(N_z + 1)\} \quad (4.26)$$

式中, N_x , N_z 分别表示在 x 轴方向和 z 轴方向上单位网格的个数。

根据给定的 Thomsen 参数可计算得到每个节点上的群速度 $U_m(\mathbf{x}_k, \theta_0, \mathbf{r}^0)$, $k \in N_1$, $m=1, 2, 3$, 分别代表 P 波, SV 波, SH 波。

至于节点之间的群速度值则由拉格朗日线性插值求得:

$$U_m^e(\mathbf{x}, \theta_0, \mathbf{r}^0) = \sum_{i=1}^4 \left\{ \prod_{j=1, j \neq i}^4 \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i^e}{\mathbf{x}_j^e - \mathbf{x}_i^e} \right\} U_m(\mathbf{x}_i^e, \theta_0, \mathbf{r}^0) \quad (4.27)$$

3、旅行时间的初始化及最小走时计算

给模型节点赋值, 炮点赋值为零, 其余节点赋值为 10^7 , 从炮点开始计算波前走时。

为了计算网格内部节点的最小走时, 可以逐步的向相邻节点扩大搜索区域, 任意两个节点 (i, j) 之间的走时可以简单的通过距离与速度的比值来求得:

$$t_j^m = \min_{i \in N_j} \left\{ t_i^m + \frac{2|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|}{U_m^e(\mathbf{x}_i, \theta_0^i, \mathbf{r}_{ij}^0) + U_m^e(\mathbf{x}_j, \theta_0^j, \mathbf{r}_{ij}^0)} \right\}, m=1, 2, 3 \quad (4.28)$$

式中, N_j 为波前点到待接收点之间的子集, $U_m^e(\mathbf{x}_i, \theta_0^i, \mathbf{r}_{ij}^0)$, $U_m^e(\mathbf{x}_j, \theta_0^j, \mathbf{r}_{ij}^0)$ 则都是由式 4.27 计算求得。

4、射线路径的输出

根据 4.28 计算出了最小走时, 可以得到从炮点到检波器点之间的走时, 同时亦可得到由每个节点坐标组成的相应路径。由于主要研究的是反射波, 故走时计算是从炮点到界面反射点再到检波器点之间的最小走时, 路径亦为相应的路径。

4.4.2 正演计算程序的编制及实现

TI 介质属于各向异性介质的范畴, 其正反演的原理与均质体相比较为复杂, 尤其是反演比较复杂, 本文对于 TI 介质只介绍其正演过程, 反演待以后再研究。

TI 介质正演模拟流程图如图 4.3,

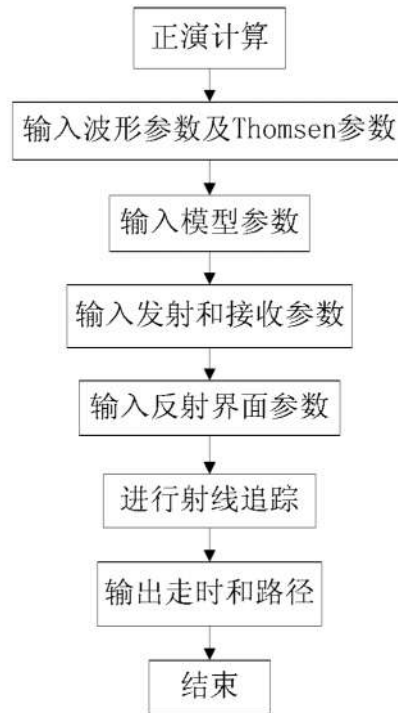


图 4.3 TI 介质正演模拟路程图

TI 介质的模型参数可以有五个弹性参数 ($a_{11}, a_{13}, a_{33}, a_{55}, a_{66}$) 定义, 也可以由 Thomsen 参数 ($\alpha, \beta, \epsilon, \delta, \gamma$) 及与对称轴的入射角 (θ) 进行定义, 这些参数的值根据 (X, Z) 坐标值来定义。

输入文件包括: 控制参数、模型网格参数、炮点接收点个数及坐标、模型信息 (界面参数)。弹性参数或者 Thomsen 参数文件均要每个参数设单独的一个文件夹。

控制参数包括波形特征: P 波、SV 波、SH 波, 还包括是选择弹性参数 ($a_{11}, a_{13}, a_{33}, a_{55}, a_{66}$) 表征模型还是由 Thomsen 参数 ($\alpha, \beta, \epsilon, \delta, \gamma$) 及入射角 (θ) 来表征模型。

模型网格参数包括: 模型长度的最大值(XMAX)和最小值(XMIN), 深度的最大值(ZMAX)和最小值(ZMIN), 网格剖分刻度的大小 DX、DZ, 主节点间的内部插值点个数 NSCALE。

定义炮点的个数 NS 及每个炮点的坐标值(X_i, Z_i), 定义检波器点的个数 NR 及每个检波器点的坐标值(X_i, Z_i), 定义炮点与检波器点之间的波形特征。

定义界面的参数, 如界面的个数 N, 界面上点的坐标(X_i, Z_i)。

在完成这些步骤后就可以进行正演模型的计算。

输出文件: 利用最短路径射线追踪算法可以得到的两种输出参数: 射线路径 (RAY TRACE) 和相对应的走时 (TRAVEL TIME)。根据最短路径射线追踪, 在设定输出参数时定义输出的路径为走时最短路径, 输出其在网格内部的坐标, 同时输

出对应的节点内部走时。在得到了路径坐标参数后利用 Grapher 软件把射线路径绘制出来，走时则利用来进行参数反演。

4.5 本章小结

本章通过总结堤坝介质的反演理论，针对各向同性与横观各向同性两种介质模型，研究了堤坝的反射波反演方法，分析了各向同性介质下利用最小二乘正交分解法对于线性方程组的求解，给出了反射波正演程序及反演程序的编制及实现过程。分析了横观各向同性介质下的非线性反演方法，给出了 TI 介质下的反射波软件的编制及实现过程。结论如下：

- 1、最小二乘正交分解法作为求解稀疏矩阵方程组的算法具有占用内存小，运算速度快的特点，能够有效的压制误差的传递，具有较快的收敛性；
- 2、非线性反演方法中的全局算法具有可以在整个模型空间搜索、不会陷入局部极值、不依赖于初始值、在一定的限定条件下寻求到全局最优解的优点。局部算法具体收敛速度快、算法简单等优点；

第五章 均质模型数值模拟研究

基于堤坝的常见类型，本章选用比较普遍的均质坝和心墙坝作为分析对象，利用编制的反射波程序来对其进行数值模拟。

5.1 均质坝

5.1.1 不含隐患均质坝

参照工程实际，拟定均质坝的尺寸为：长 40m、高 10m，剖面尺寸为：坝顶宽 6m，坝底宽 46m，坡度为 1:2，利用反射波对于模型进行正反演研究，为更好的分析内部结构，采用立面和剖面分别对于模型进行分析。

1、均质坝立面数值模拟

立面尺寸为 40m×10m，炮点坐标位于 (0,0) 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 (0,0)、(1,0)、...、(40,0) 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m，坝体理论体波纵波波速为 $V_P=2000\text{m/s}$ ，其正演射线追踪图如图 5.1，因其速度无变化，故没有对其进行反演。

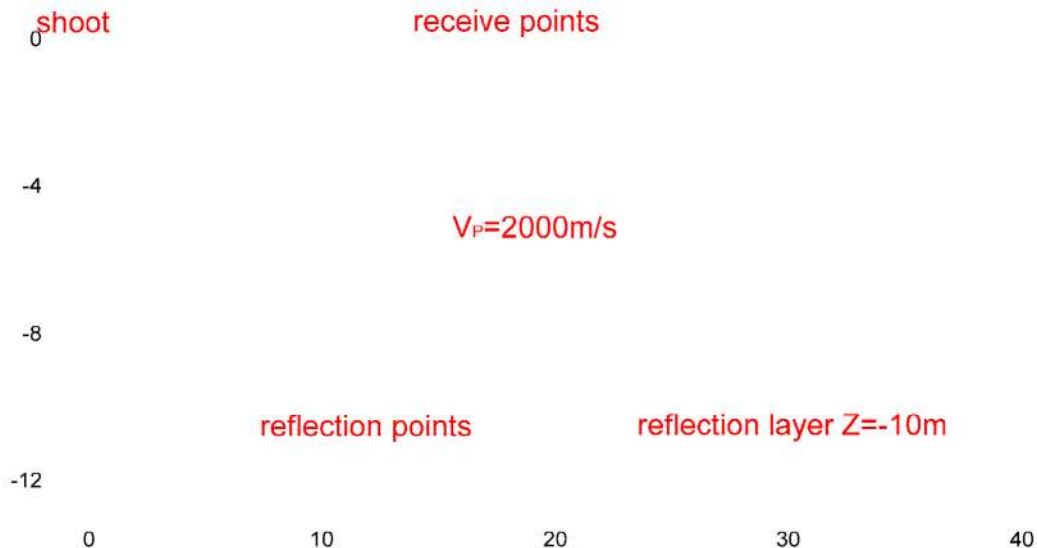


图 5.1 均质坝立面射线追踪图

2、均质坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶 6m，坝底 46m，坝高 10m，坡度 1:2，炮点坐标位于 (26,0) 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 (20,0)、(21,0)、...、(26,0)、(28,-1)、(30,-2)、(32,-3)、(34,-4)、(36,-5)、(38,-6)、(40,-7)、(42,-8)、

(44, -9)、(2, -9)、(4, -8)、(6, -7)、(8, -6)、(10, -5)、(12, -4)、(14, -3)、(16, -2)、(18, -1) 共有 25 个检波器点, 反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处, 计算时考虑坝基向下 2m, 坝体理论体波纵波波速为 $V_p=2000\text{m/s}$, 其正演射线追踪图如图 5.2, 因其速度无变化, 故没有对其进行反演。

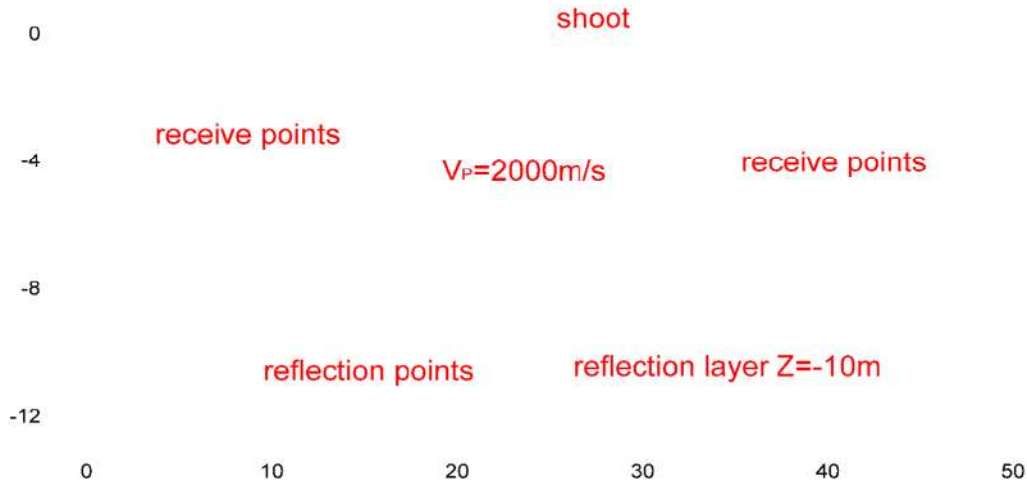


图 5.2 均质坝剖面射线追踪图

5.1.2 含渗漏通道均质坝

1、含渗漏通道均质坝立面数值模拟

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$, 渗漏通道位于 (20, -5) 点附近, 炮点坐标位于 (0,0) 处, 检波器点坐标位于坡顶表面, 间隔 1m 布置, 如 (0,0)、(1,0)、...、(40,0) 等, 共有 41 个检波器点, 反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处, 计算时考虑坝基向下 2m, 坝体理论体波纵波波速为 $V_p=2000\text{m/s}$, 假定渗漏通道节点速度为 500m/s , 其正演射线追踪图如图 5.3, 反演计算则利用最小二乘正交分解法进行, 炮点与检波器点相互转换, 利用多发多收原理进行射线追踪, 迭代次数为 10 次, 理论模型图如图 5.4, 反演成像图如图 5.5 (图中波速单位为 m/s)。

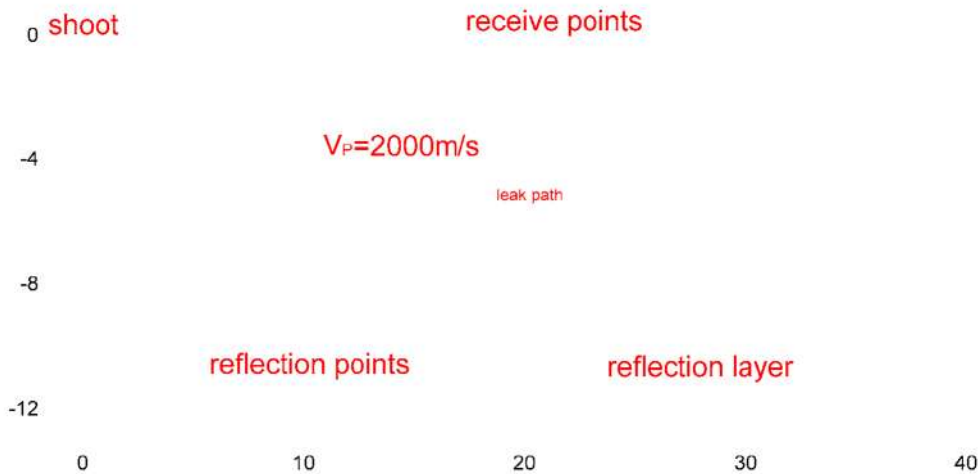


图 5.3 含渗漏通道均质坝立面射线追踪图

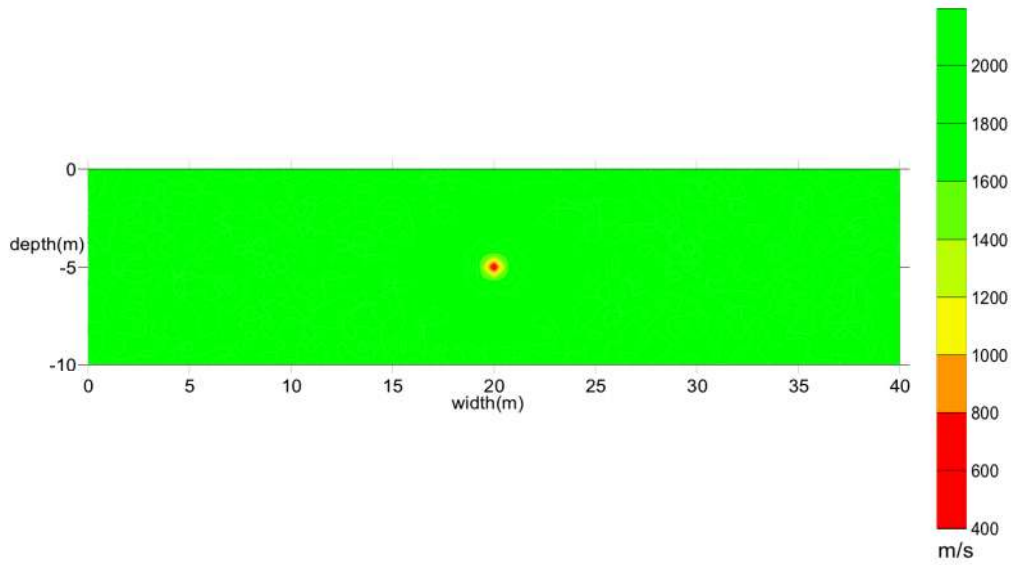


图 5.4 含渗漏通道均质坝立面理论模型图

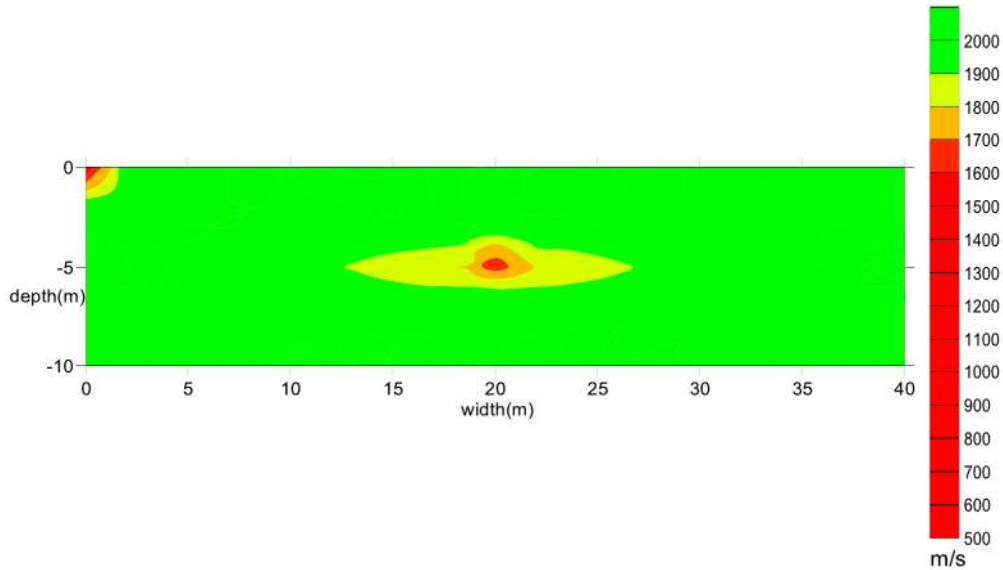


图 5.5 含渗漏通道均质坝立面反演成像图

2、含渗漏通道均质坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶宽 6m，坝底宽 46m，坝高 10m，坡度 1:2，渗漏通道 $Z=-5\text{m}$ 处，炮点坐标位于 (26,0) 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 (20,0)、(21,0)、...、(26,0)、(28, -1)、(30, -2)、(32, -3)、(34, -4)、(36, -5)、(38, -6)、(40, -7)、(42, -8)、(44, -9)、(2, -9)、(4, -8)、(6, -7)、(8, -6)、(10, -5)、(12, -4)、(14, -3)、(16, -2)、(18, -1) 共有 25 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m，坝体理论体波纵波波速为 $V_p=2000\text{m/s}$ ，假定渗漏通道节点速度为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.6，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.7，反演成像图如

图 5.8（图中波速单位为 m/s）。

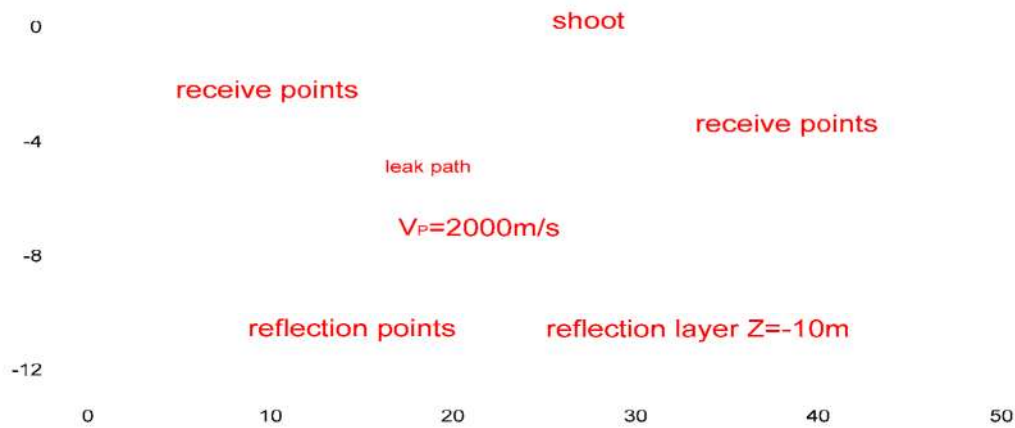


图 5.6 含渗漏通道均质坝剖面射线追踪图

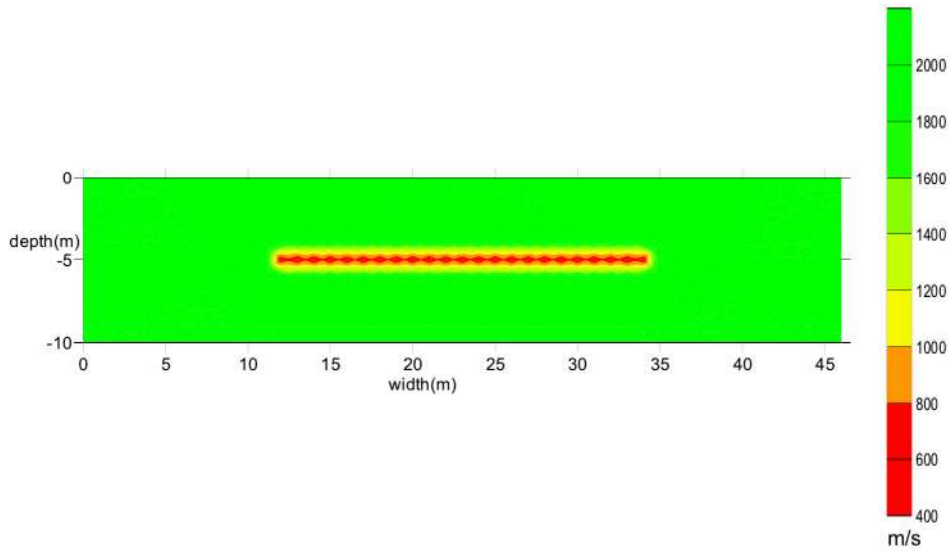


图 5.7 含渗漏通道均质坝剖面理论模型图

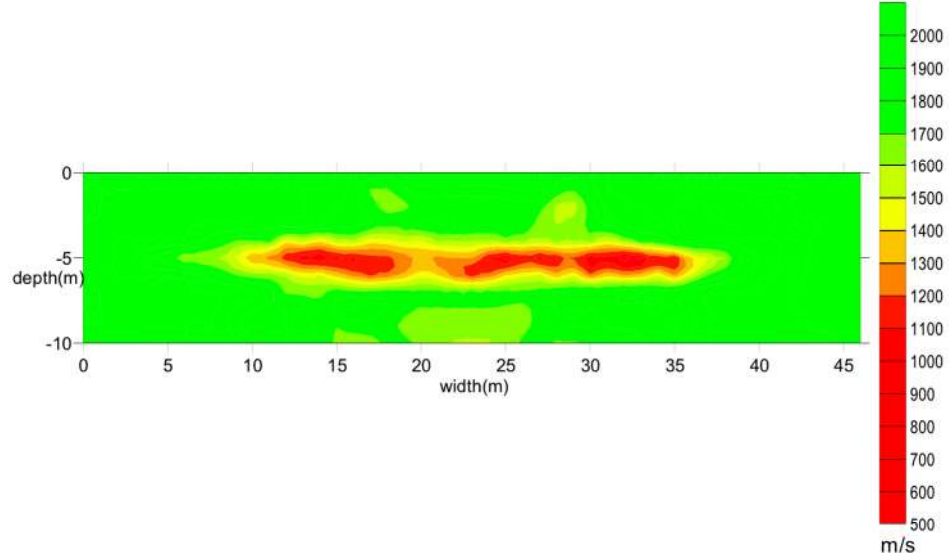


图 5.8 含渗漏通道均质坝剖面反演成像图

5.1.3 含不密实区域均质坝

1、含不密实区域均质坝立面数值模拟

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，不密实区域位于 $(19, -5)$ 、 $(20, -5)$ 、 $(19, -6)$ 、 $(20, -6)$ 四个节点所围成区域内部及边缘，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、、、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，坝体理论体波纵波波速为 $V_p=2000\text{m/s}$ ，假定不密实区域内部速度为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.9，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.10，反演成像图如图 5.11（图中波速单位为 m/s ）。

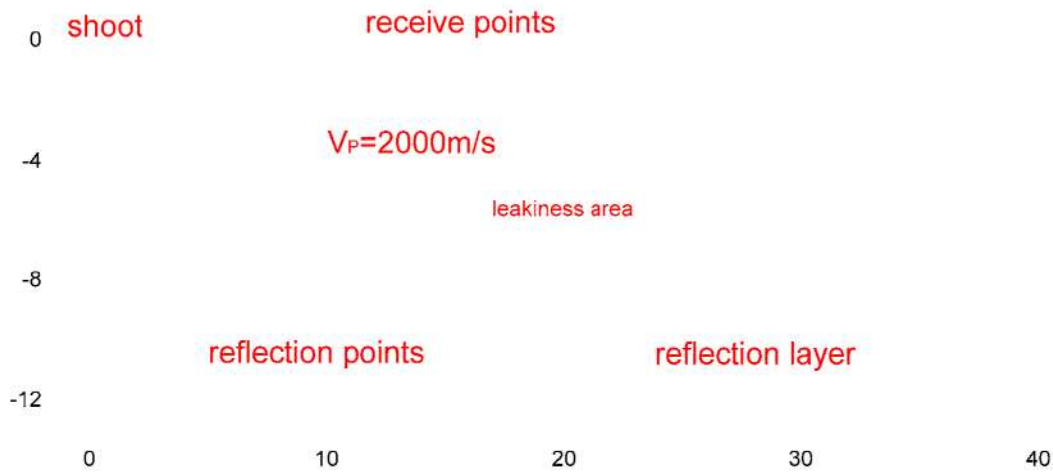


图 5.9 含不密实区域均质坝立面射线追踪图

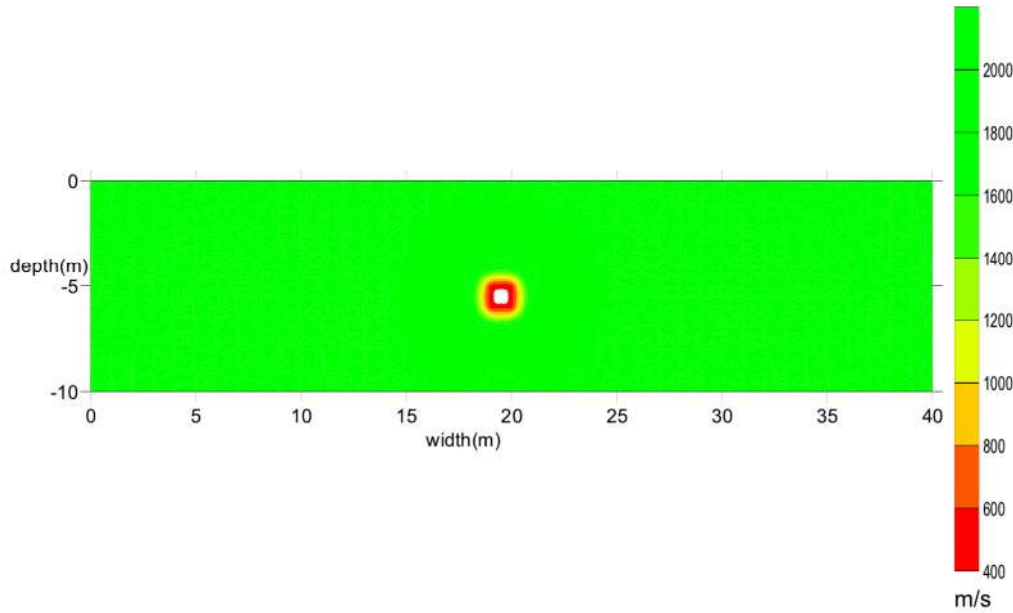


图 5.10 含不密实区域均质坝立面理论模型图

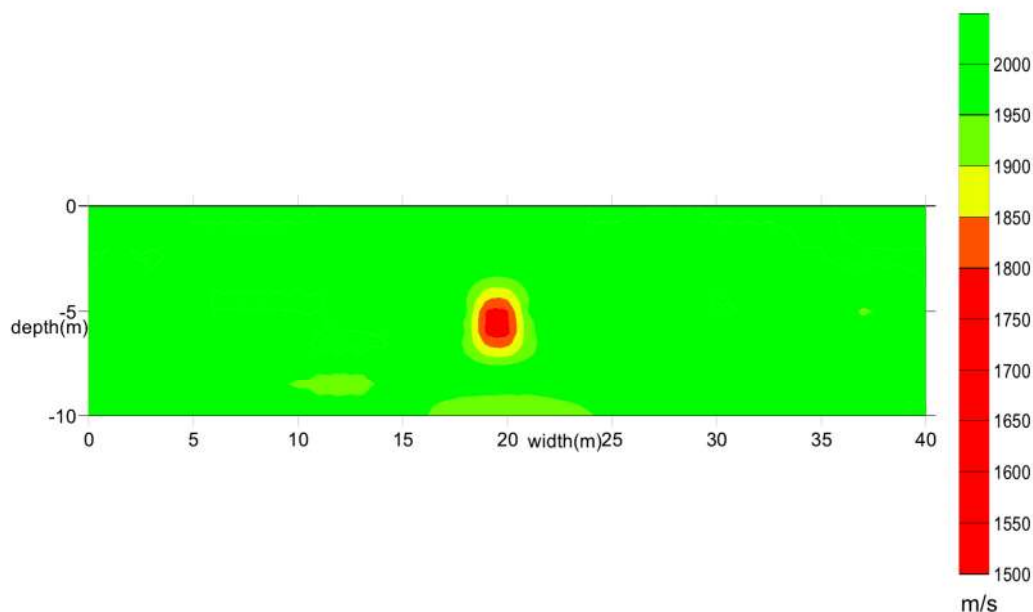


图 5.11 含不密实区域均质坝立面反演成像图

2、含不密实区域均质坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶宽 6m，坝底宽 46m，坝高 10m，坡度 1:2，不密实区域位于 (19, -5)、(20, -5)、(19, -6)、(20, -6) 四个节点所围成区域内部及边缘，炮点坐标位于 (26,0) 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 (20,0)、(21,0)、(26,0)、(28, -1)、(30, -2)、(32, -3)、(34, -4)、(36, -5)、(38, -6)、(40, -7)、(42, -8)、(44, -9)、(2, -9)、(4, -8)、(6, -7)、(8, -6)、(10, -5)、(12, -4)、(14, -3)、(16, -2)、(18, -1) 共有 25 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m，坝体理论体波纵波波速为 $V_p=2000\text{m/s}$ ，假定不密实区域内部速度为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.12，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.13，反演成像图如图 5.14（图中波速单位为 m/s ）。

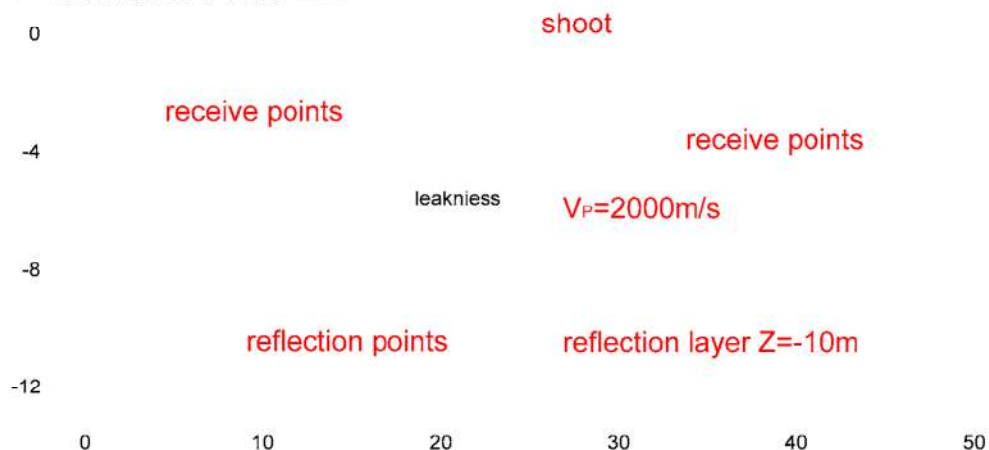


图 5.12 含不密实区域均质坝剖面射线追踪图

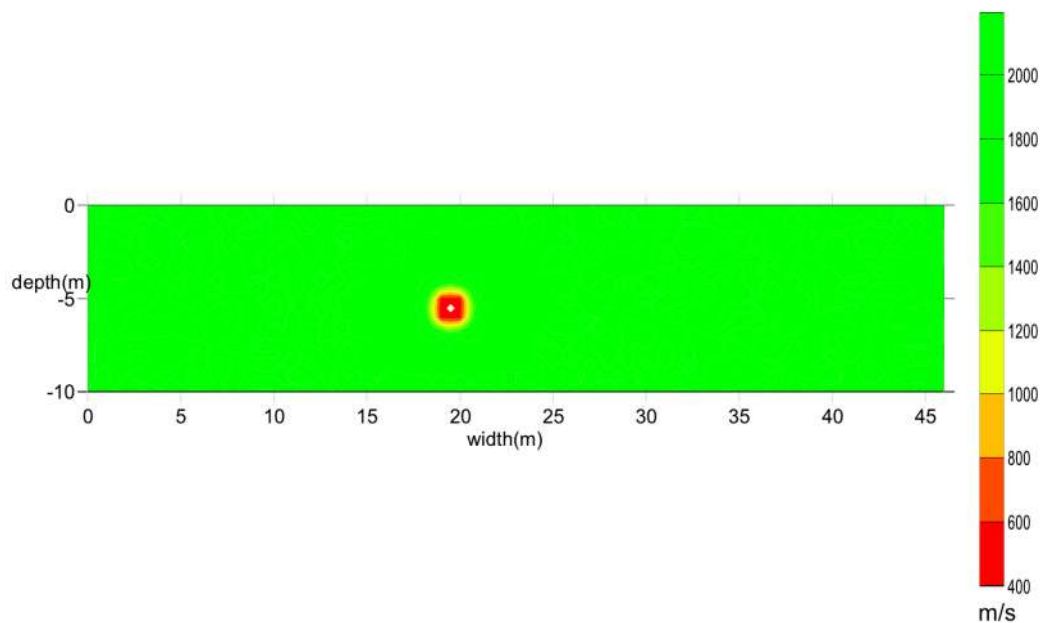


图 5.13 含不密实区域均质坝剖面理论模型图

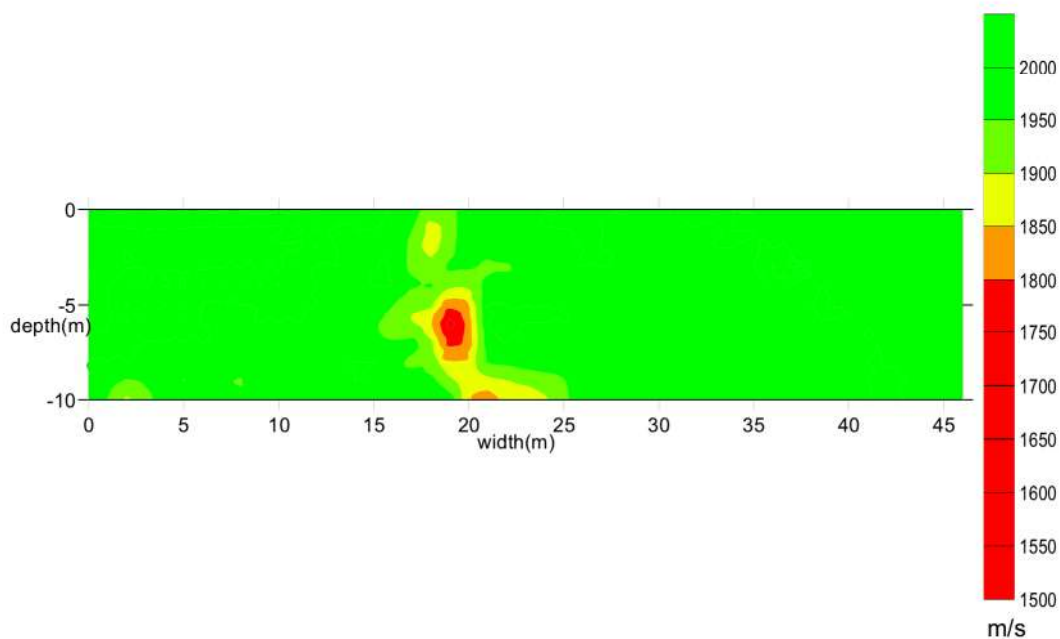


图 5.14 含不密实区域均质坝剖面反演成像图

5.2 心墙坝

5.2.1 不含隐患心墙坝

为了便于与均质坝进行对比分析，心墙坝的尺寸与均质坝一致，心墙位于 $X=23\text{m}$ 处，宽 1m 。

1、不含隐患心墙坝立面数值模拟

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、、、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位

于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，假定心墙内部纵波波速 $V_p=3000\text{m/s}$ ，其余部分波速为 $V_p=1500\text{m/s}$ ，此立面选取于心墙内部结构，其正演射线追踪图如图 5.15，因立面无速度差异，故没有给出速度成像图。

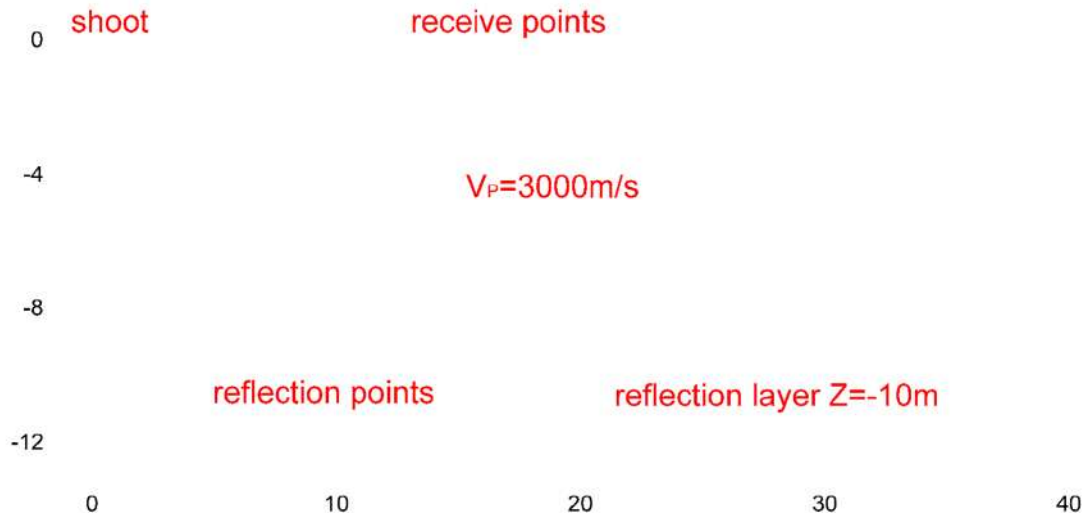


图 5.15 心墙坝立面射线追踪图

2、不含隐患心墙坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶 6m ，坝底 46m ，坝高 10m ，坡度 $1:2$ ，心墙位于 $X=23\text{m}$ 处，宽度 1m ，炮点坐标位于 $(26,0)$ 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 $(20,0)$ 、 $(21,0)$ 、、、 $(26,0)$ 、 $(28,-1)$ 、 $(30,-2)$ 、 $(32,-3)$ $(34,-4)$ 、 $(36,-5)$ 、 $(38,-6)$ 、 $(40,-7)$ 、 $(42,-8)$ 、 $(44,-9)$ 、 $(2,-9)$ 、 $(4,-8)$ 、 $(6,-7)$ 、 $(8,-6)$ 、 $(10,-5)$ 、 $(12,-4)$ 、 $(14,-3)$ 、 $(16,-2)$ 、 $(18,-1)$ 共有 25 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，心墙内部的纵波波速为 3000m/s ，其余部分为 1500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.16，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.17，反演成像图如图 5.18（图中波速单位为 m/s ）。

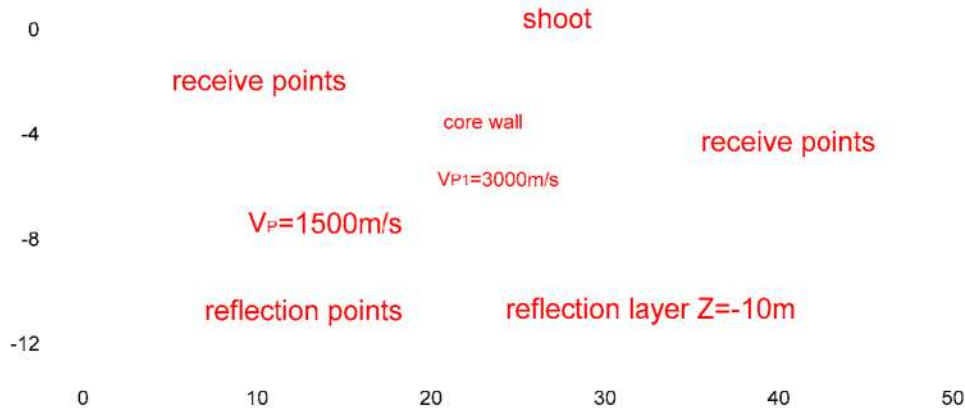


图 5.16 心墙坝剖面射线追踪图

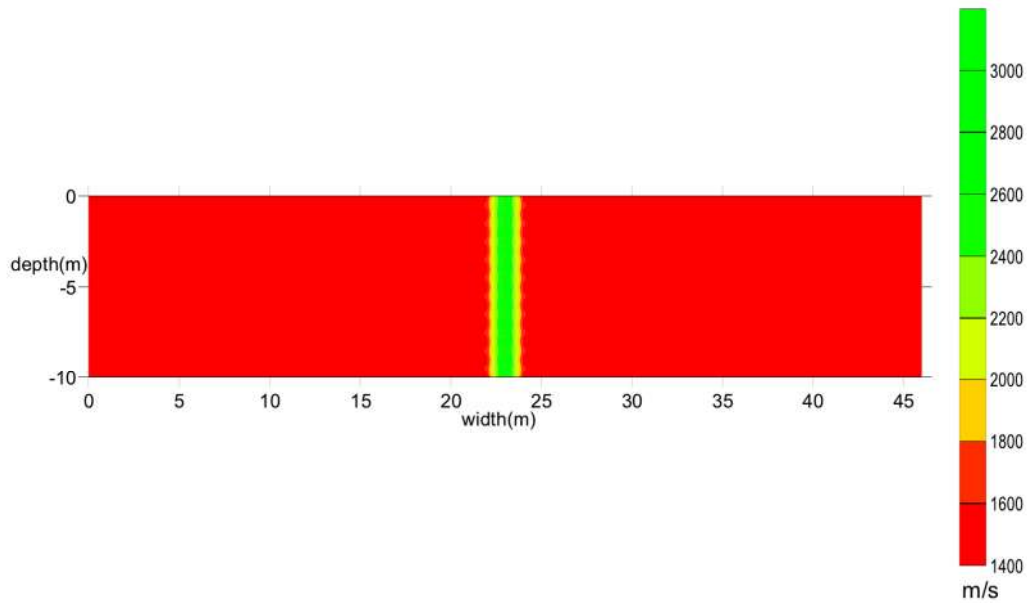


图 5.17 心墙坝剖面理论模型图

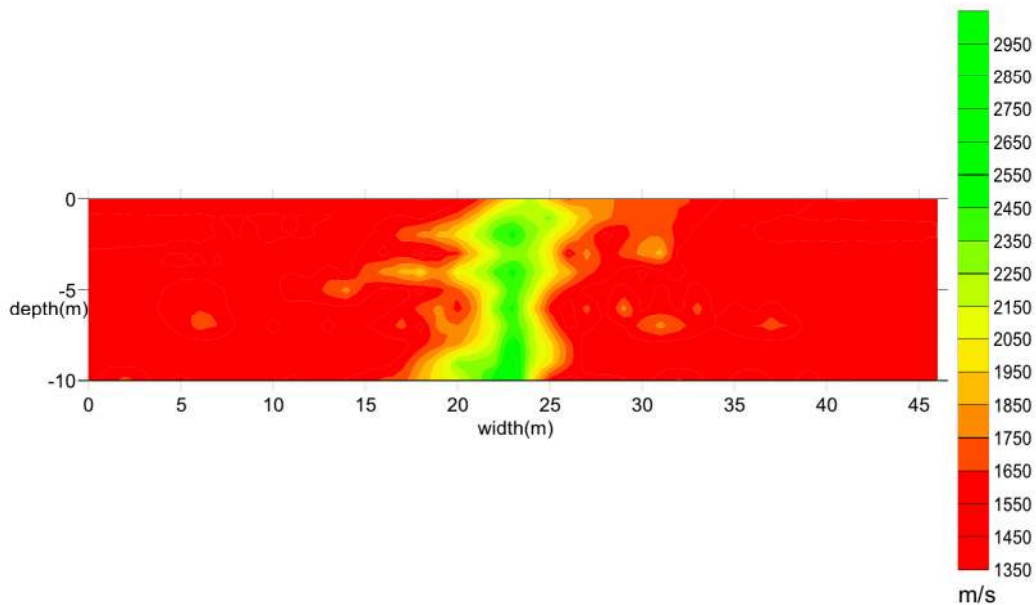


图 5.18 心墙坝剖面反演成像图

5.2.2 含渗漏通道心墙坝

1、含渗漏通道心墙坝立面数值模拟

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，渗漏通道位于 $(20, -5)$ 点附近，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、...、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，心墙位置坝体纵波波速为 $V_p=3000\text{m/s}$ ，假定渗漏通道节点速度为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.19，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，

理论模型图如图 5.20，反演成像图如图 5.21（图中波速单位为 m/s）。

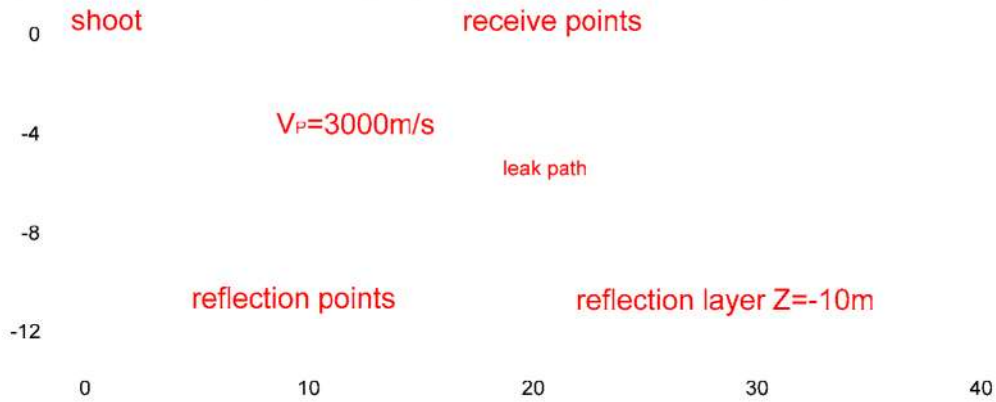


图 5.19 含渗漏通道心墙坝立面射线追踪图

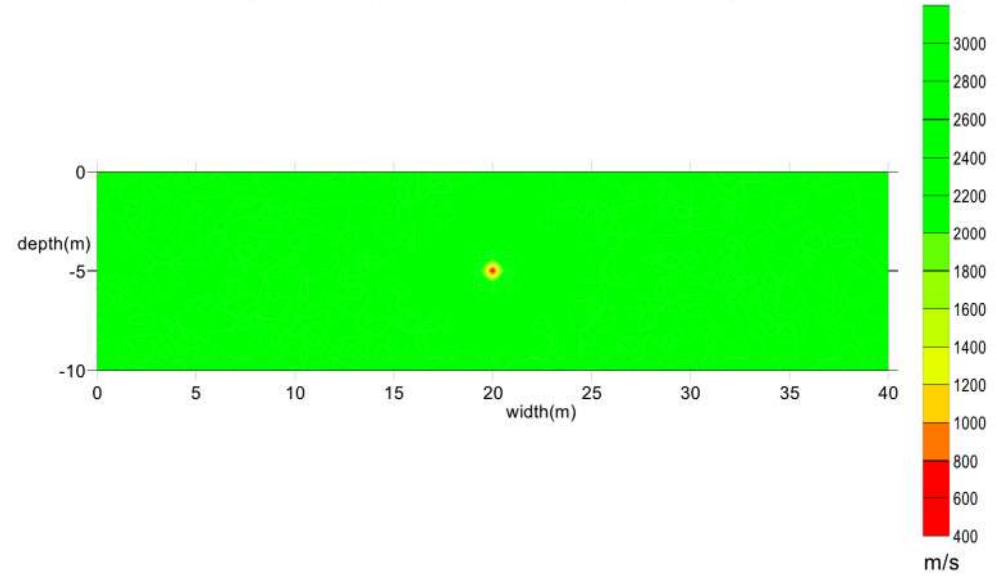


图 5.20 含渗漏通道心墙坝立面理论模型图

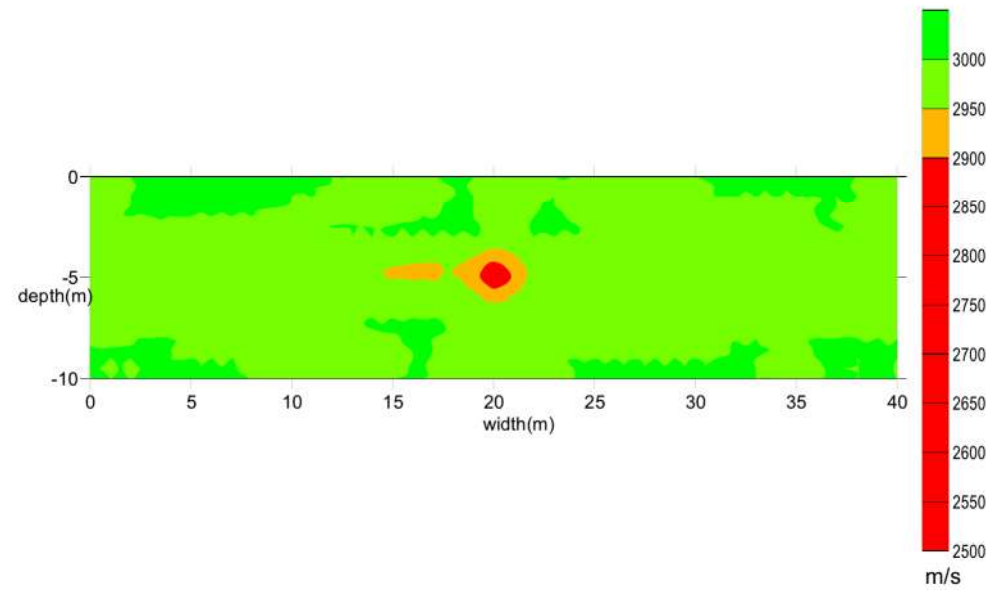


图 5.21 含渗漏通道心墙坝立面反演成像图

2、含渗漏通道心墙坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶宽 6m，坝底宽 46m，坝高 10m，坡度 1:2，渗漏通道 $Z=-5\text{m}$ 处，炮点坐标位于 (26,0) 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 (20,0)、(21,0)、...、(26,0)、(28, -1)、(30, -2)、(32, -3)、(34, -4)、(36, -5)、(38, -6)、(40, -7)、(42, -8)、(44, -9)、(2, -9)、(4, -8)、(6, -7)、(8, -6)、(10, -5)、(12, -4)、(14, -3)、(16, -2)、(18, -1) 共有 25 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m，心墙介质纵波速为 3000m/s，坝体纵波波速为 $V_p=1500\text{m/s}$ ，假定渗漏通道节点速度为 500m/s，其正演射线追踪图如图 5.22，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.23，反演成像图如图 5.24（图中波速单位为 m/s）。

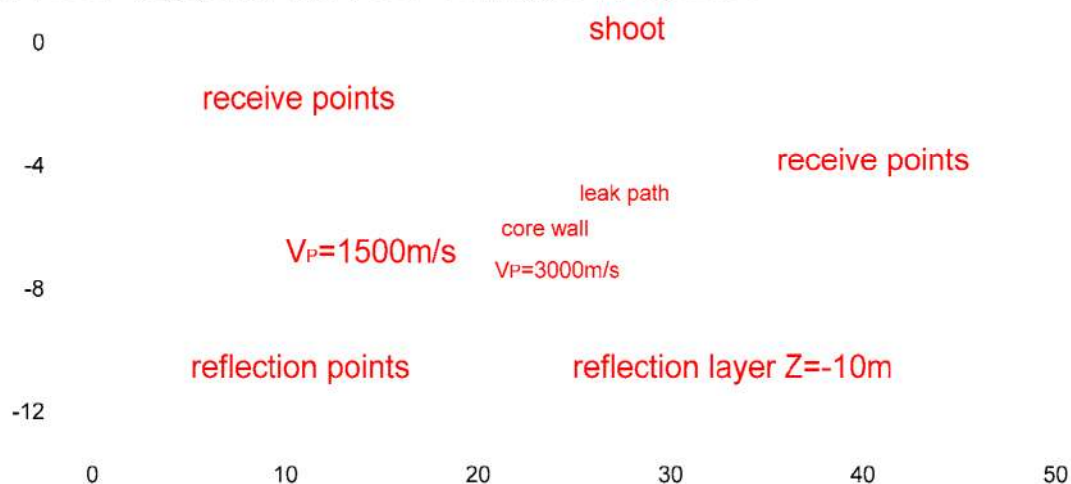


图 5.22 含渗漏通道心墙坝剖面射线追踪图

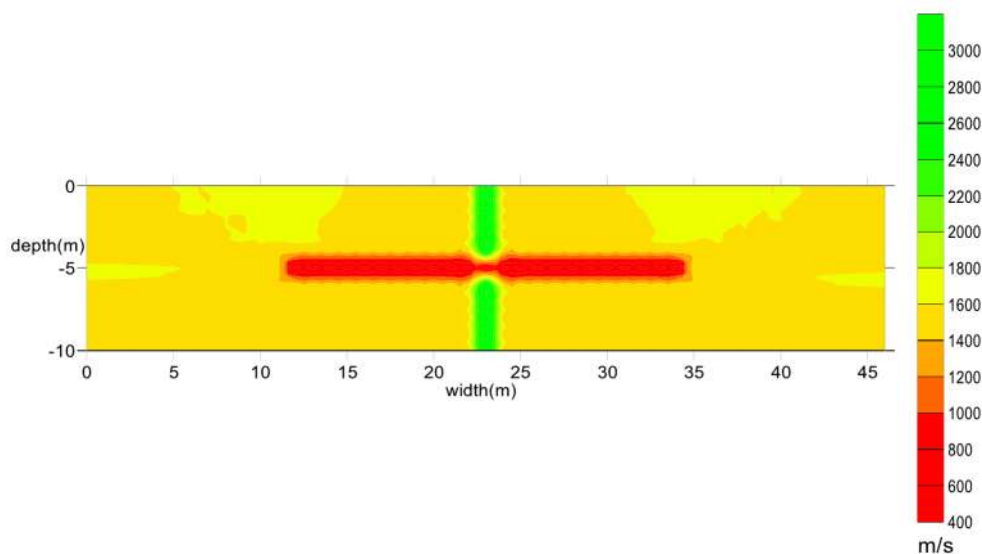


图 5.23 含渗漏通道心墙坝剖面理论模型图

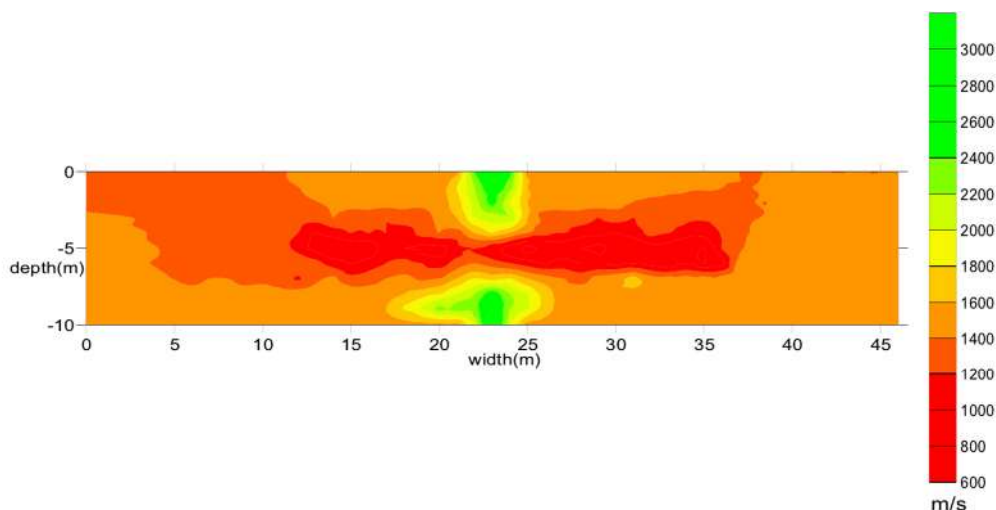


图 5.24 含渗漏通道心墙坝剖面反演成像图

5.2.3 含不密实区域心墙坝

1、含不密实区域心墙坝立面数值模拟

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，不密实区域位于 $(19, -5)$ 、 $(20, -5)$ 、 $(19, -6)$ 、 $(20, -6)$ 四个节点所围成区域内部及边缘，其位于心墙背部，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，心墙内部介质纵波波速为 $V_p=3000\text{m/s}$ ，不密实区域内部速度为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.25，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.26，反演成像图如图 5.27（图中波速单位为 m/s ）。

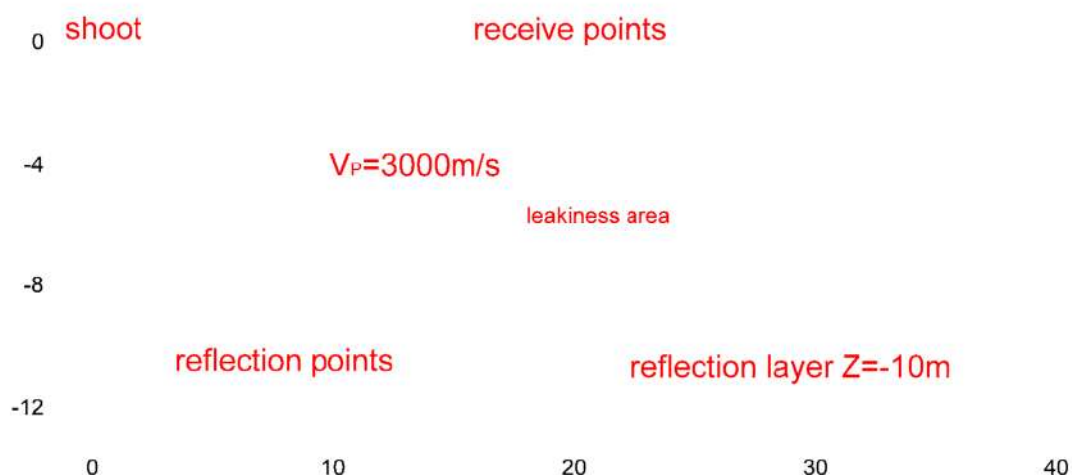


图 5.25 含不密实区域心墙坝立面射线追踪图

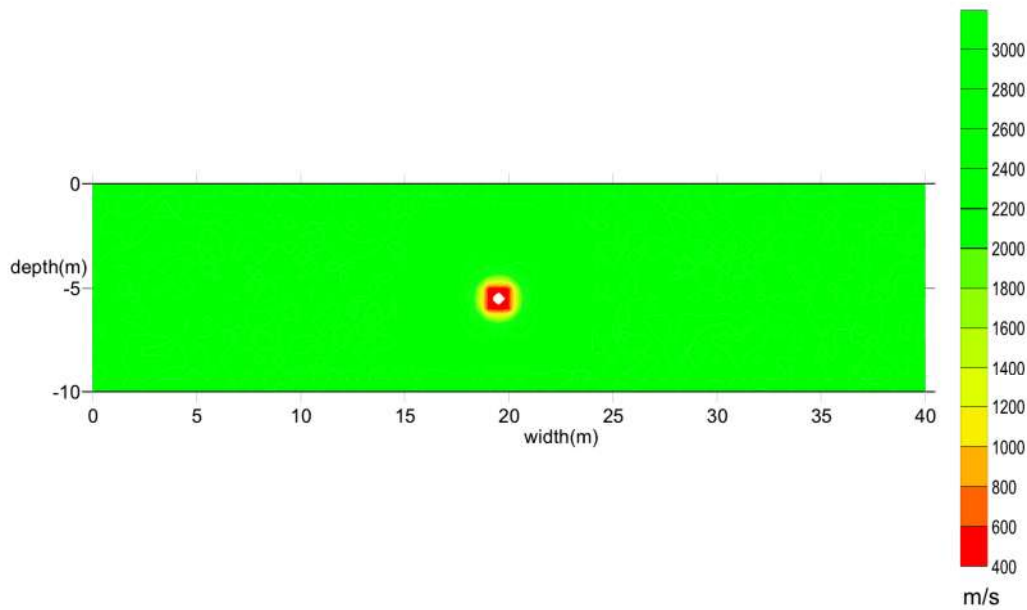


图 5.26 含不密实区域心墙坝立面理论模型图

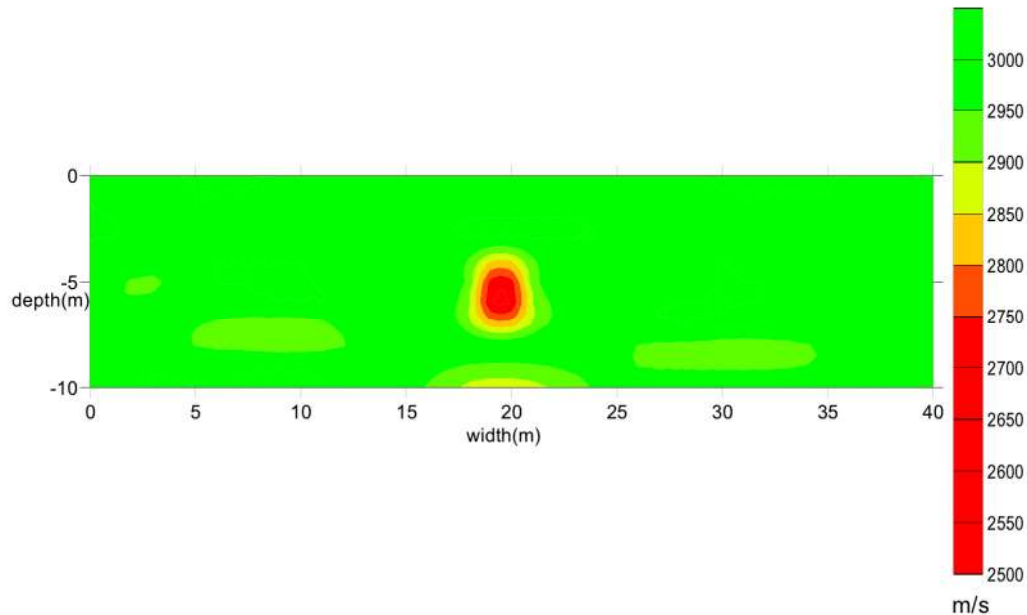


图 5.27 含不密实区域心墙坝立面反演成像图

2、含不密实区域心墙坝剖面数值模拟

剖面形状为梯形，坝顶宽 6m，坝底宽 46m，坝高 10m，坡度 1:2，不密实区域位于 (19, -5)、(20, -5)、(19, -6)、(20, -6) 四个节点所围成区域内部及边缘，炮点坐标位于 (26,0) 处，检波器点布置于外界面，其坐标如下 (20,0)、(21,0)、(26,0)、(28, -1)、(30, -2)、(32, -3)、(34, -4)、(36, -5)、(38, -6)、(40, -7)、(42, -8)、(44, -9)、(2, -9)、(4, -8)、(6, -7)、(8, -6)、(10, -5)、(12, -4)、(14, -3)、(16, -2)、(18, -1) 共有 25 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m，心墙介质纵波速为 3000m/s ，坝

体纵波波速为 $V_p=1500\text{m/s}$ ，假定不密实区域内部波速为 500m/s ，其正演射线追踪图如图 5.28，反演计算则利用最小二乘正交分解法进行，炮点与检波器点相互转换，利用多发多收原理进行射线追踪，迭代次数为 10 次，理论模型图如图 5.29，反演成像图如图 5.30（图中波速单位为 m/s ）。

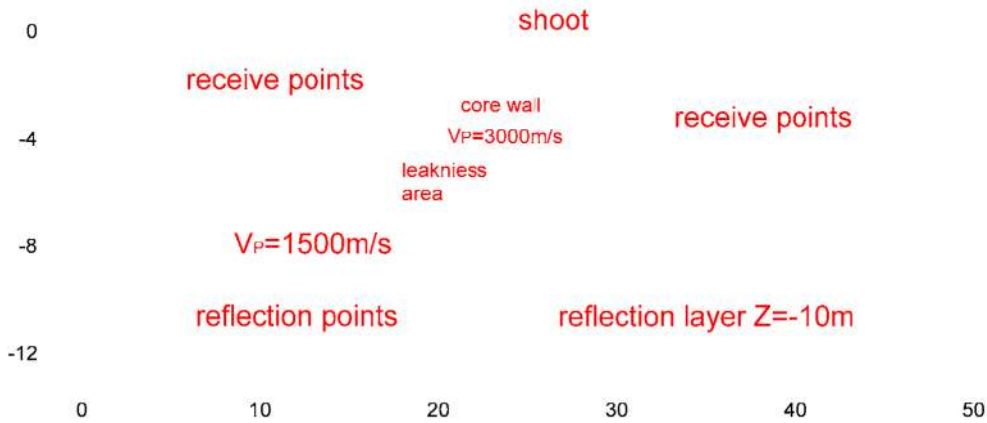


图 5.28 含不密实区域心墙坝剖面射线追踪图

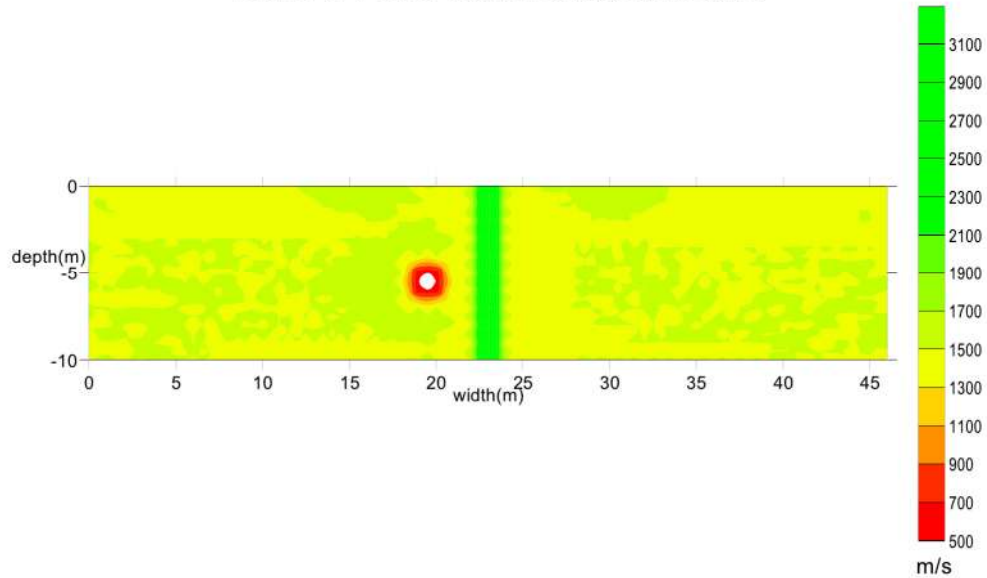


图 5.29 含不密实区域心墙坝剖面理论模型图

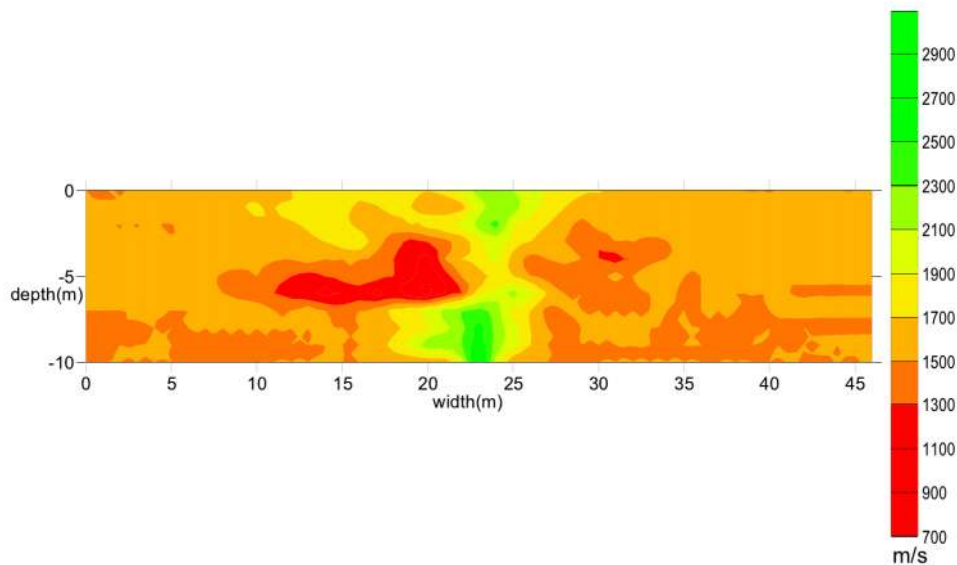


图 5.30 含不密实区域心墙坝剖面反演成像图

5.3 误差分析

为了检验反演的可靠性，分析其解的收敛性，提出走时相对误差参数进行鉴定，主要是将反演结束时的走时与正演模拟的走时进行比较，定义第 i 个走时相对误差的公式为：

$$\Delta t = \frac{t_i - t_i^0}{t_i^0} \quad (5.1)$$

式中， t_i^0 为第 i 个正演模拟的走时数据， t_i 为反演计算结束后所得的最小走时数据。

因炮检点数目较多，在分析过程中每个模型只选择三组数据进行分析。

5.3.1 含渗漏通道均质坝走时误差分析

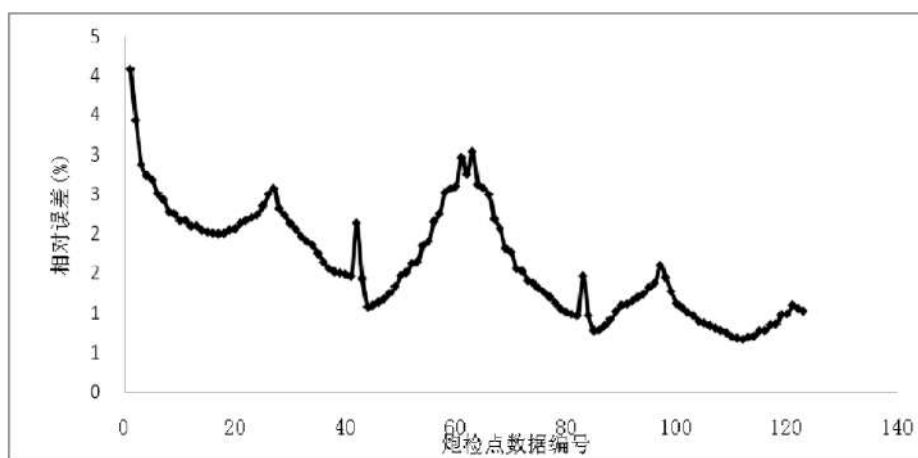


图 5.31 含渗漏通道均质坝立面走时相对误差

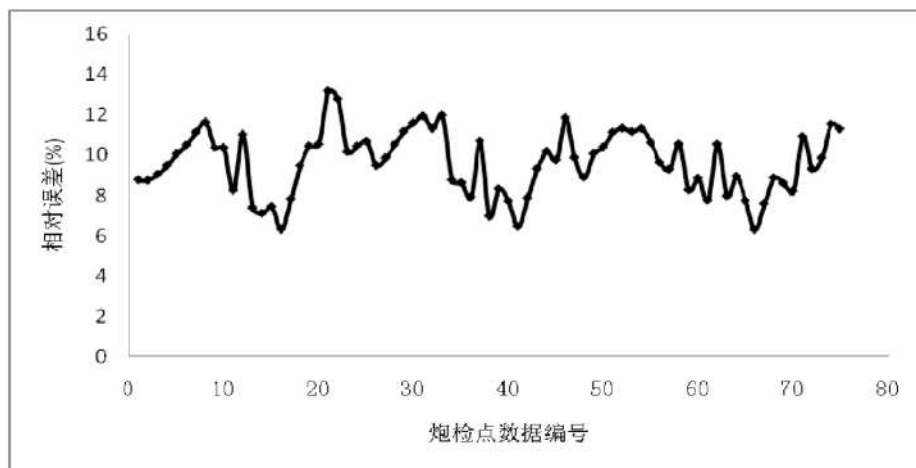


图 5.32 含渗漏通道均质坝剖面走时相对误差

5.3.2 含不密实区域均质坝走时误差分析

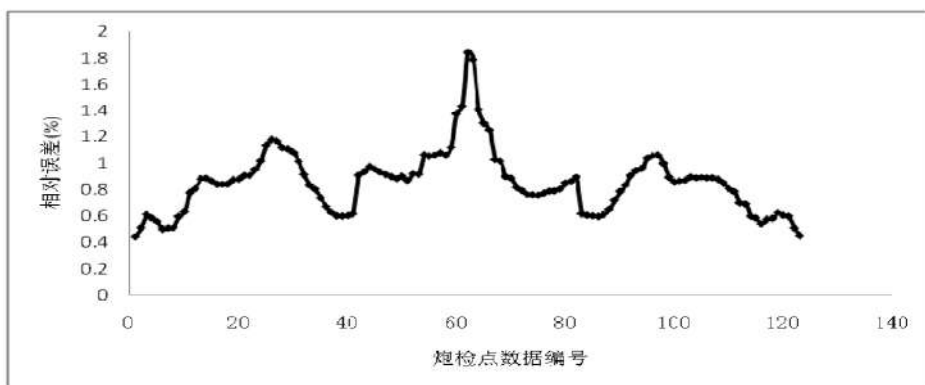


图 5.33 含不密实区域均质坝立面走时相对误差

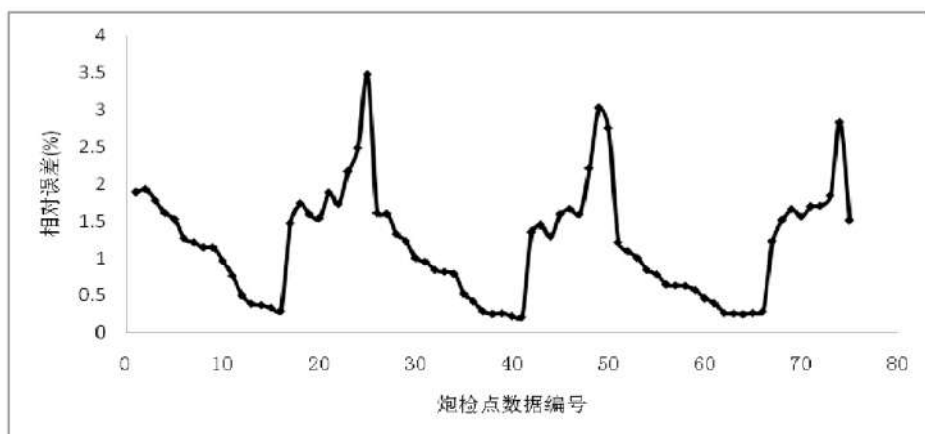


图 5.34 含不密实区域均质坝剖面走时相对误差

5.3.3 含渗漏通道心墙坝走时误差分析

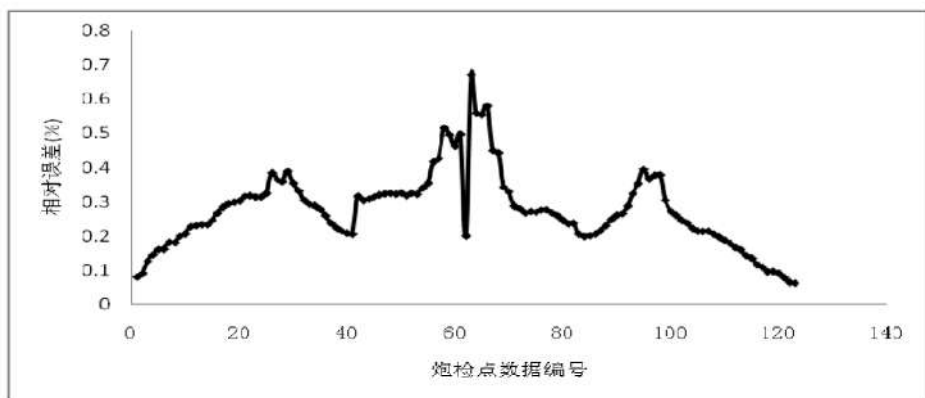


图 5.35 含渗漏通道心墙坝立面走时相对误差

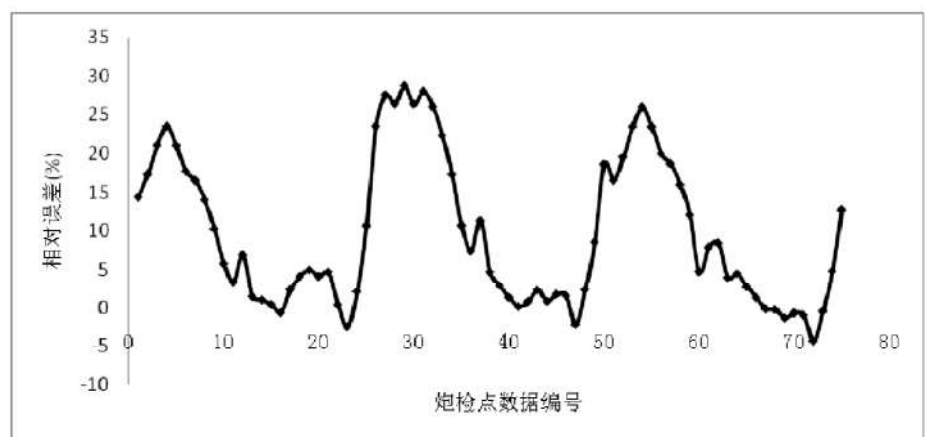


图 5.36 含渗漏通道心墙坝剖面走时相对误差

5.3.4 含不密实区域心墙坝走时误差分析

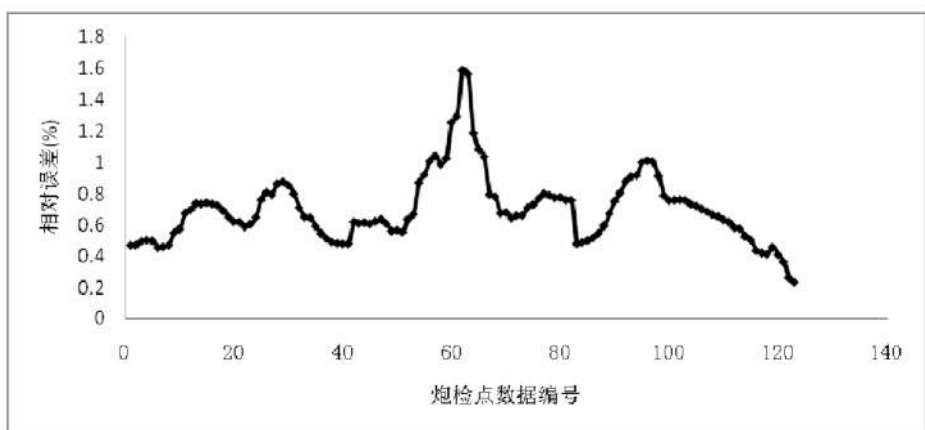


图 5.37 含不密实区域心墙坝立面走时相对误差

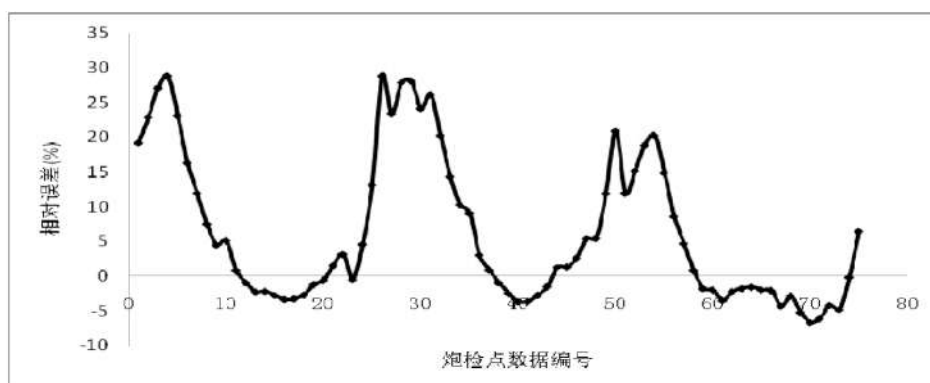


图 5.38 含不密实区域心墙坝剖面走时相对误差

5.4 结果讨论

本章基于反射波，利用最短路径射线追踪技术及最小二乘正交分解法对于堤坝介质中的各向同性介质条件下的堤坝隐患进行成像分析，分别采用了均质坝与心墙坝作为对比分析，在同一坝型内分别采用不含隐患、含渗漏通道、含不密实区域三种类型作为对比分析。

5.4.1 均质坝与心墙坝成像的对比分析

对于均不含隐患情况下，两种坝型的立面射线追踪基本一致，对于剖面射线追踪则由于心墙的存在有所差异，与坝体内部结构的速度有关，对于心墙坝理论模型图与反演成像图对比发现反演效果基本上反映出了心墙的位置，但由于射线数量、角度及算法的原因，不能够完全的对于位置进行定位；

对于含渗漏通道的两种坝型进行对比发现，由于立面均为一种波速内部存在渗漏点，故射线追踪图基本一致，反演成像图也基本一致，对于渗漏通道的位置基本能够反演出来，但对于尺寸则还是有一定误差。对于剖面则由于心墙坝存在两种速度外加渗漏通道，反演难度加大，对比均质坝剖面反演图可知反演效果较差，但位置还是能够大致定位；

对于含不密实区域的两种坝型对比发现，在立面上两种坝型的正反演效果均相差不大，对于剖面上则有一定的差异，心墙坝的不密实区域不能够很好的反演出来，速度与理论模型也存在一定的差异。

5.4.2 同种坝型不同隐患对比分析

通过采用不含隐患、含渗漏通道、含不密实区域三种条件来对于其反射波成像进行研究，发现由于条件设置的不同，所得出的波动特征均有所不同，如含渗漏通道与含不密实区域进行对比，渗漏通道尺寸较小，反演起来难得更大，只能定性的反演，而不能够定量的反映其大小，而尺寸较大的反演效果则更为接近。

5.4.3 影响因素分析

对于本章的反演效果进行分析发现成像效果还是能够比较真实的反映出堤坝内部的隐患，如渗漏通道、不密实区域等，但是其对于隐患的形状、尺寸及其波速值大小的定量反映则存在一定的误差，对于其原因进行分析如下：

（1）网格的划分。由于堤坝内部的隐患尺寸均相对较小，要反演出更为逼真的效果，需要对于网格进行更为细小的划分，但是这样却成倍的增加了计算机运算的时间且降低了效率；

（2）射线角度。由于反射波成像利用的是反射波这一波形，其在堤坝内部的旅行存在一定的盲区，此时则需要布设密集的炮检点来进行弥补，这样就成倍的增加了节点的运算数量，降低了反演效率；

（3）介质。在数值模拟计算中的介质模型已经是理想化的模型，在工程实践中则要面对更为复杂的介质条件，此时的反演精度会遇到更大的挑战；

（4）测线的布设。为了完整的反映出堤坝内部的隐患特征，需要全方位的对于坝体进行相应的检测，则此时测线的布设方式显得尤为重要，不仅要在剖面上进行布设，还要在立面上进行布设。

5.5 本章小结

本章基于各向同性介质下的最短路径射线追踪正演理论及最小二乘正交分解反演理论程序，分别对于均质坝和心墙坝两种坝型进行了数值模拟分析。分析了立面和剖面下三种坝体内部情况：不含隐患、含渗漏通道、含不密实区域，对于每种坝型在每种隐患下的走时误差进行了分析，采用不同对比组对于数值模拟的反演成像图进行分析，其结论如下：

1、同种坝型的不同隐患的反演效果有一定差异，主要是射线在进行追踪时网格划分大小的原因；

2、同种隐患不同坝型的反演效果也存在差异，因为内部结构影响着射线的路径；

3、通过走时误差对比分析，射线在经过无隐患处的误差很小，而在经过有隐患位置时误差较大，说明速度的大小差异影响着射线的路径；

4、通过反演成像发现，反演结果能够较好的确定隐患的位置，这为对于堤坝隐患的处理提供了很好的资料。

第六章 TI 介质模型数值模拟实现

上一章基于各向同性介质对于堤坝的隐患模型进行了正反演研究，然而在土石介质模型中真正的各向同性介质很少，是一种理想化的模型。对于本文所要研究的对象——堤坝来说，其介质类型更加倾向于各向异性介质中的横观各向同性介质，如用各向同性介质进行研究势必会造成错误的处理和解释结果，为了更加精确的对于堤坝隐患进行研究，介质模型的正确选取显得更为重要。本章基于横观各向同性介质模型对于堤坝介质中的隐患进行数值模拟研究，分析其与各向同性介质走时差异及波动特性，为以后的相关研究打下基础。

在各向同性介质中体波包括 P 波和 SV 波两种，而在横观各向同性介质中 SV 波会出现横波分裂的现象，此时 SV 波分裂成 SV 和 SH 两种波形。因为 P 波比 SV 波速度更快更早的到达检波器，在各向同性介质中主要研究的对象为 P 波，而在横观各向同性介质中由于各向异性弹性参数较多，单一波形的研究并不能很好的体现其各向异性的分布，故对于三种波形同时进行研究，有助于介质内部参数的研究。由于堤坝的立面与剖面的正演区别不大，本章只对于模型的立面进行数值模拟研究。

6.1 均质坝

6.1.1 含渗漏通道均质坝

模型计算尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，渗漏通道位于 $(20, -5)$ 点附近，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、、、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，其弹性参数取值见表 6-1。

表 6-1 介质 Thomsen 参数的取值表

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ϵ	γ	δ
坝体	2000	1000	0.1	0.1	0.15
渗漏通道	500	250	0	0	0

采用 0° 、 45° 、 90° 三个角度入射，波形采用 P 波、SV 波、SH 波进行射线追踪。

(1) 0° 入射下 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

0° 入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.1-6.3。

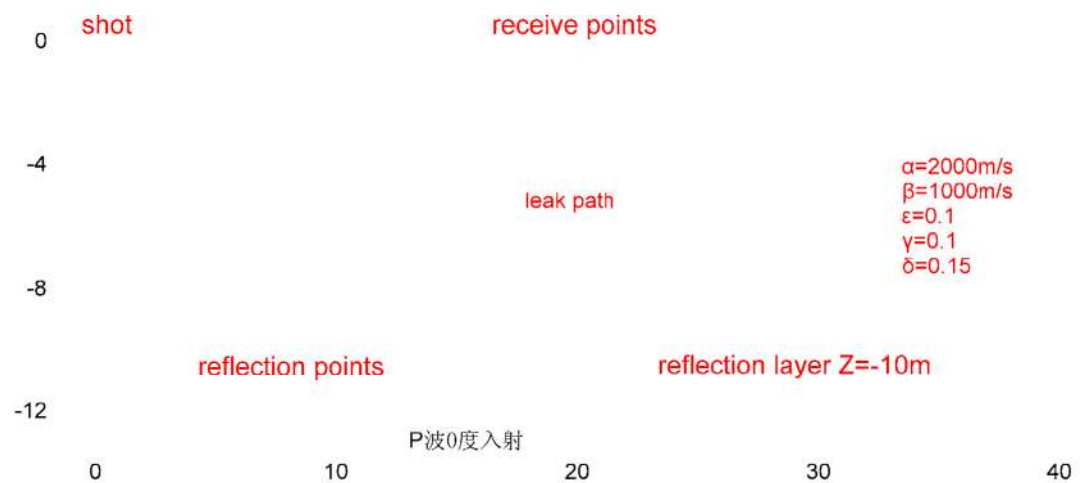


图 6.1 P 波 0°入射射线追踪图

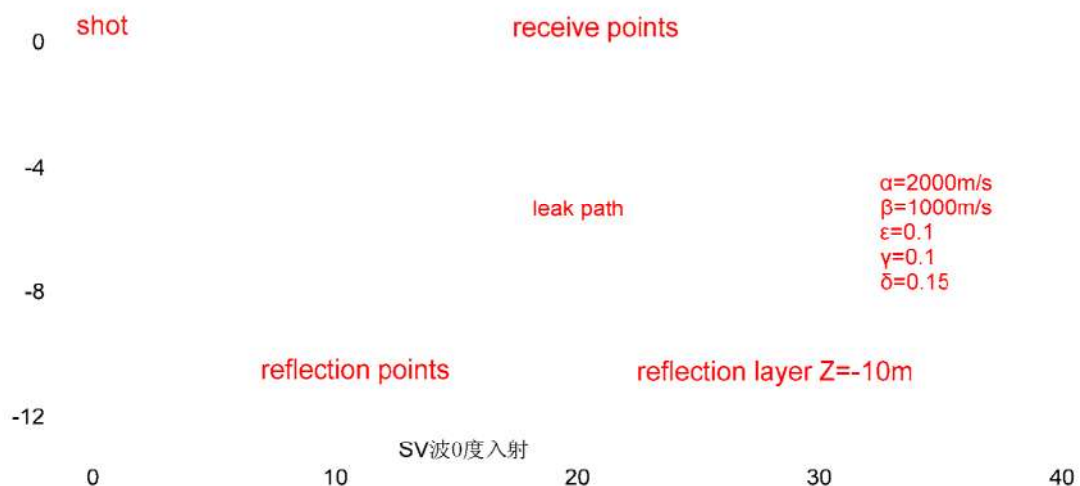


图 6.2 SV 波 0°入射射线追踪图



图 6.3 SH 波 0°入射射线追踪图

0°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.4。

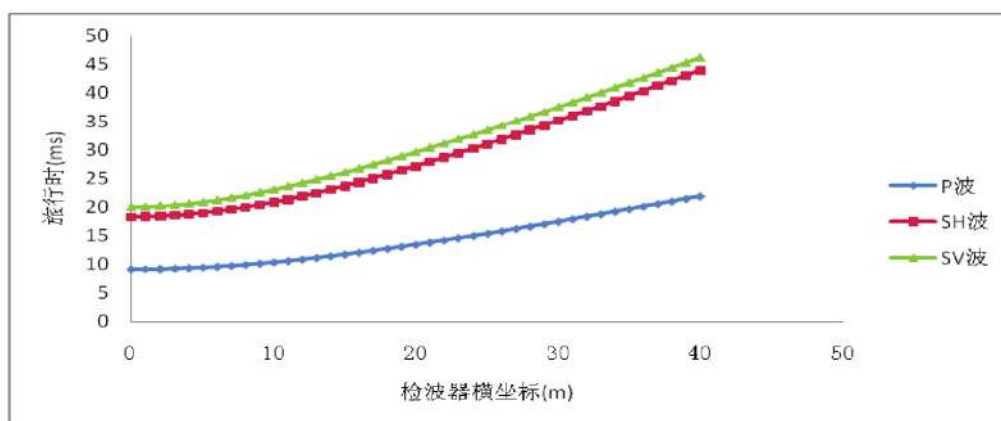


图 6.4 不同波形 0° 入射走时差异图

(2) 45° 入射下 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

45° 入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.5-6.7。

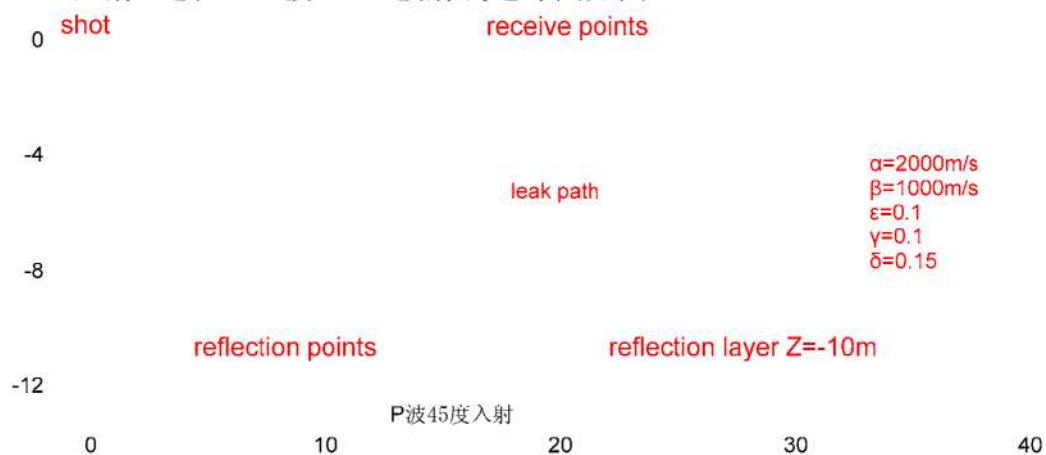


图 6.5 P 波 45° 入射射线追踪图

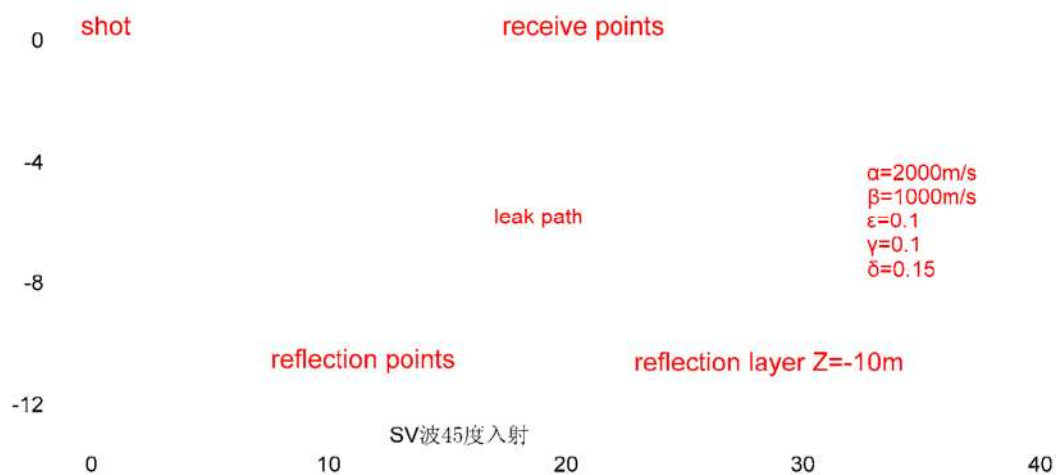


图 6.6 SV 波 45° 入射射线追踪图



图 6.7 SH 波 45°入射射线追踪图

45°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.8。

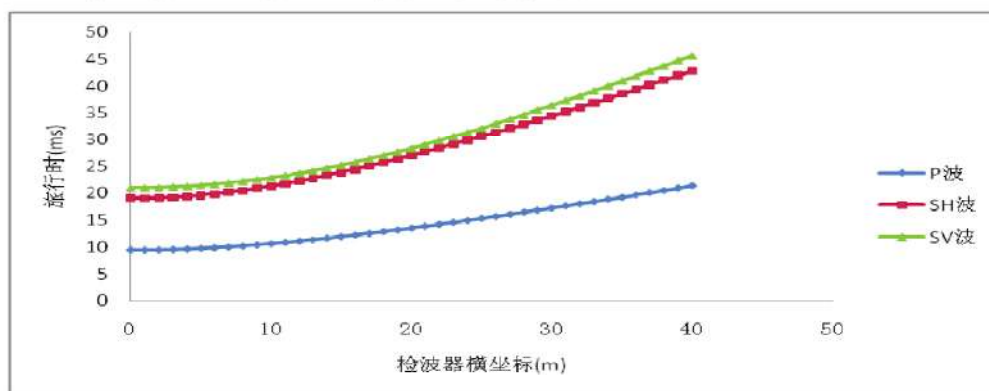


图 6.8 不同波形 45°入射走时差异图

(3) 90°入射 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

90°入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.9-6.11。

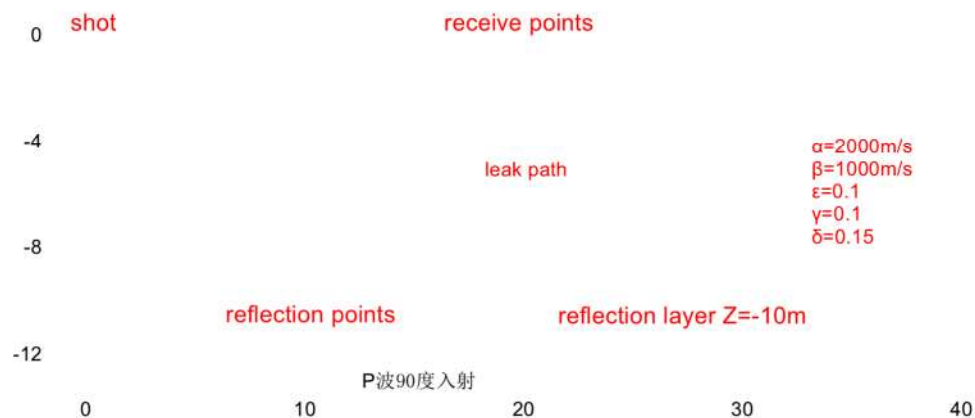


图 6.9 P 波 90°入射射线追踪图

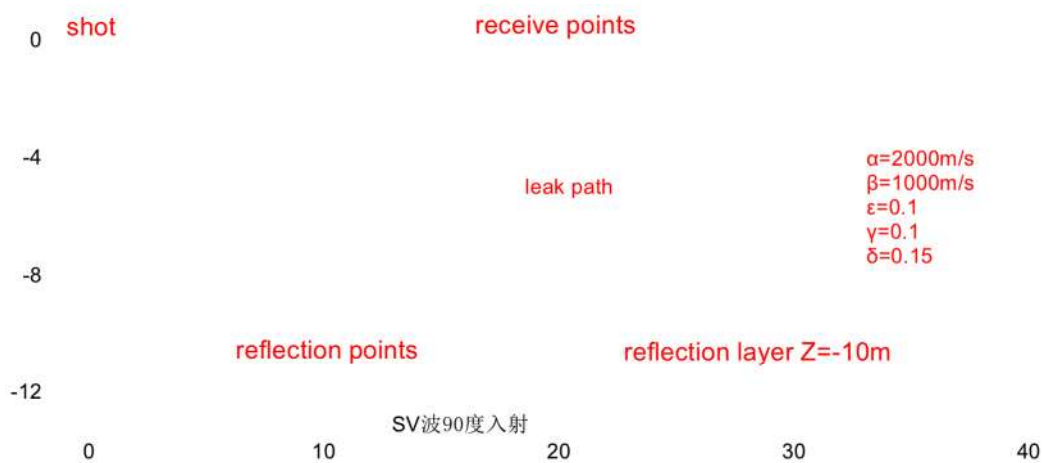


图 6.10 SV 波 90°入射射线追踪图



图 6.11 SH 波 90°入射射线追踪图

45°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.12。

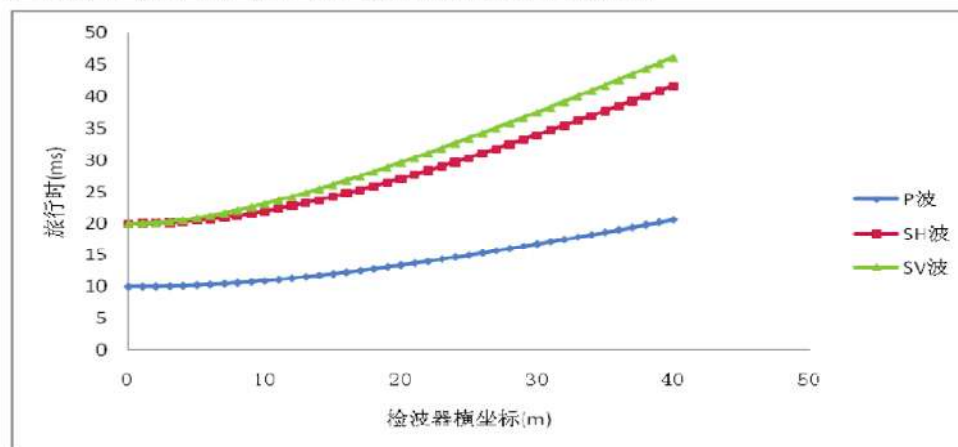


图 6.12 不同波形 90°入射走时差异图

(4) 同种波形不同入射角的走时差异如图 6.13-6.15。

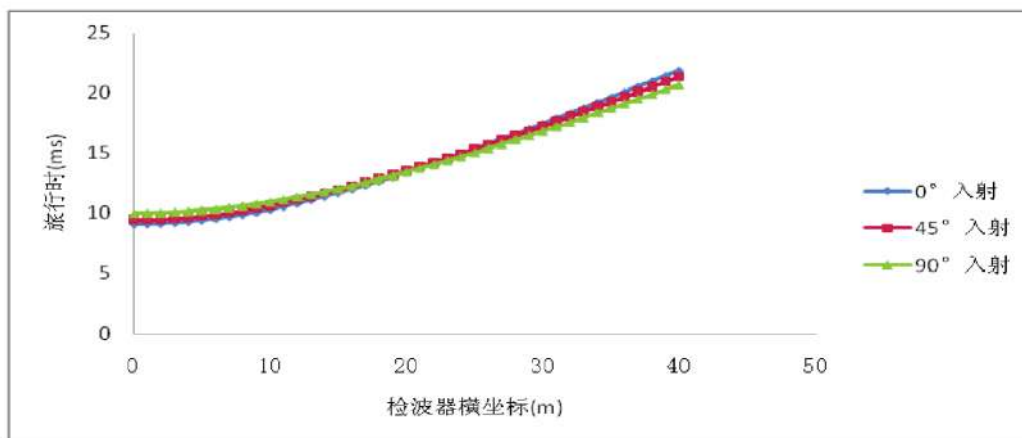


图 6.13 P 波不同入射角度走时差异图

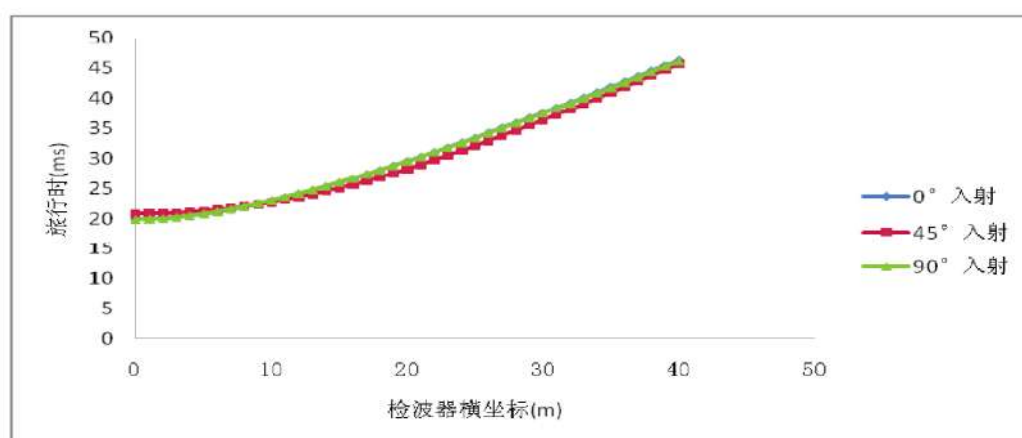


图 6.14 SV 波不同入射角度走时差异图

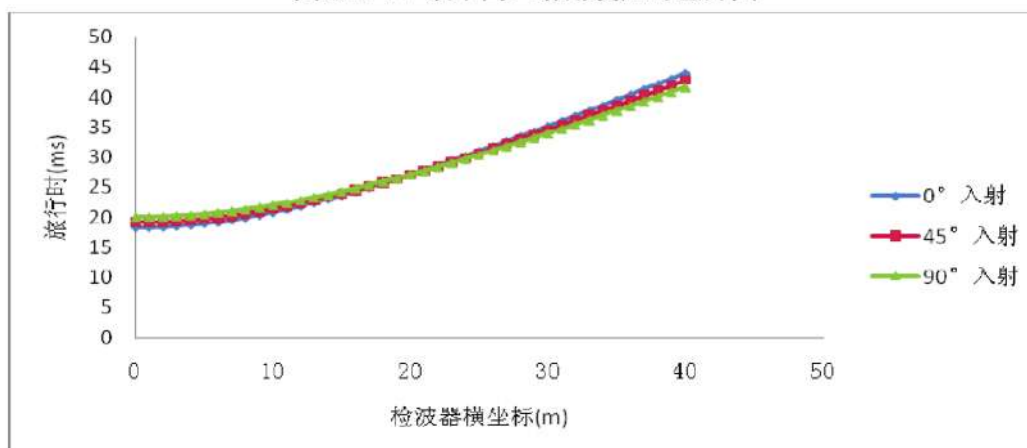


图 6.15 SH 波不同入射角度走时差异图

(5) 对比分析

通过对于图 6.1-6.3、图 6.5-6.7、图 6.9-6.11 三组对比图分析, 可知不同的波形在相同的入射角度下射线路径是不一致的, 在同一波形下不同的射线入射角度也会导致射线路径的不一致, 每一组炮检点在反射界面上反射点也存在差异, 可知在采用不同波形不同入射角度进行数值模拟会产生不同的效果。

通道对于图 6.4、图 6.8、图 6.12 三个图进行分析知不同入射角度的炮检点走时不一致，存在一定的差异，在 90° 入射时 SV 波与 SH 波波速在离炮点较近位置时速度一致，随着炮检距的扩大速度开始不一致，从这里可以看出横波分裂的现象，对于 0° 入射和 45° 入射时 SH 波与 SV 波在进入介质就已经分开。

通过图 6.13-6.15 对比分析可知 P 波速度最快，SH 波其次，SV 波最慢，在同一种波形中三个入射角度走时存在交叉点，位置位于居中的检波器点。在离炮点较近的检波器处最先接收到的是 0° 入射来的波，随着距离的逐渐拉大， 0° 入射的路径变得更长，最先到达检波器的为 90° 入射的波，对于 SV 波而言， 0° 入射与 90° 入射其走时是一致的，没有区别，不同角度走时交叉点出现位置较其他波形更为接近炮点。

6.1.2 含不密实区域均质坝

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，不密实区域位于 $(19, -5)$ 、 $(20, -5)$ 、 $(19, -6)$ 、 $(20, -6)$ 四个节点所围成区域内部及边缘，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、、、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，其弹性参数取值见表 6-2。

表 6-2 介质 Thomsen 参数取值表

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ϵ	γ	δ
坝体	2000	1000	0.1	0.1	0.15
不密实区域	500	250	0	0	0

采用 0° 、 45° 、 90° 三个角度入射，波形采用 P 波、SV 波、SH 波进行射线追踪。

(1) 0° 入射下 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

0° 入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.16-6.18。

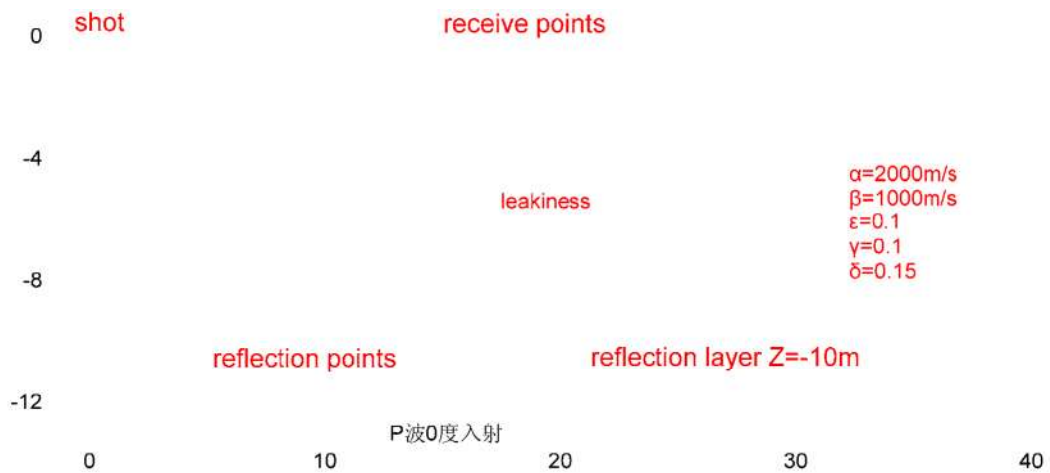


图 6.16 P 波 0°入射射线追踪图

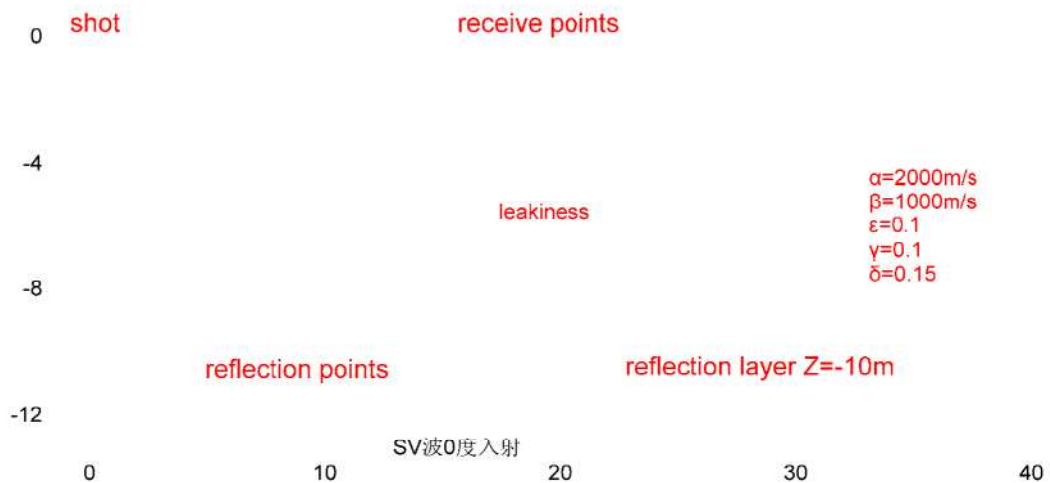


图 6.17 SV 波 0°入射射线追踪图

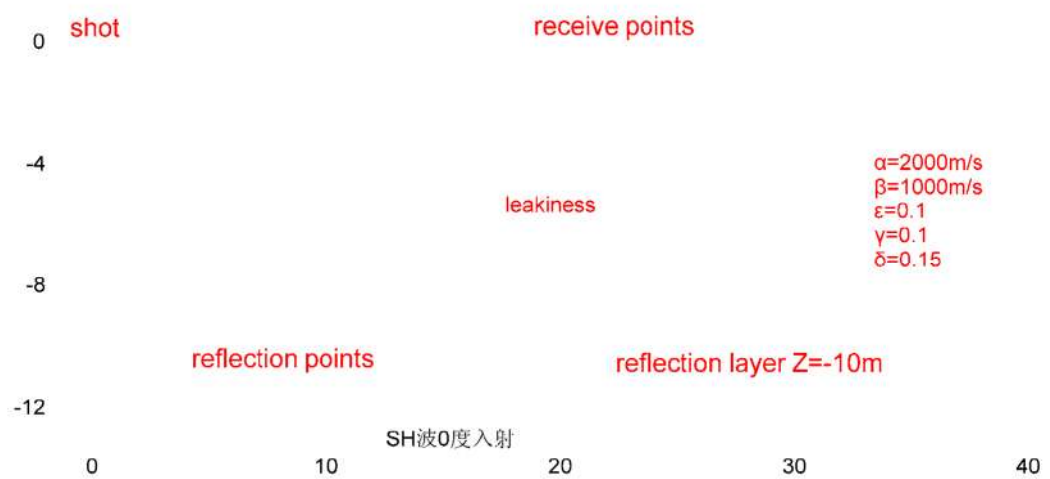


图 6.18 SH 波 0 度入射射线追踪图

0°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.19。

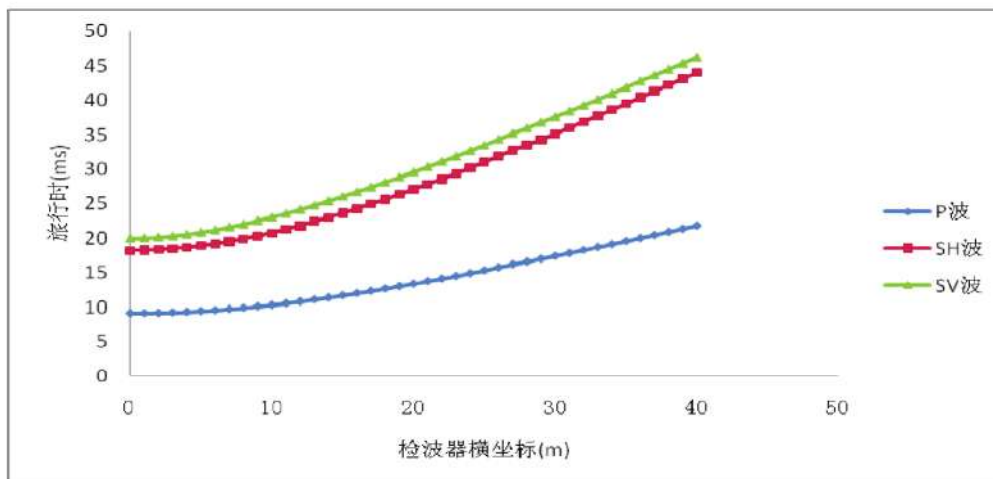


图 6.19 不同波形 0°入射走时差异图

(2) 45°入射下 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

45°入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.20-6.22。

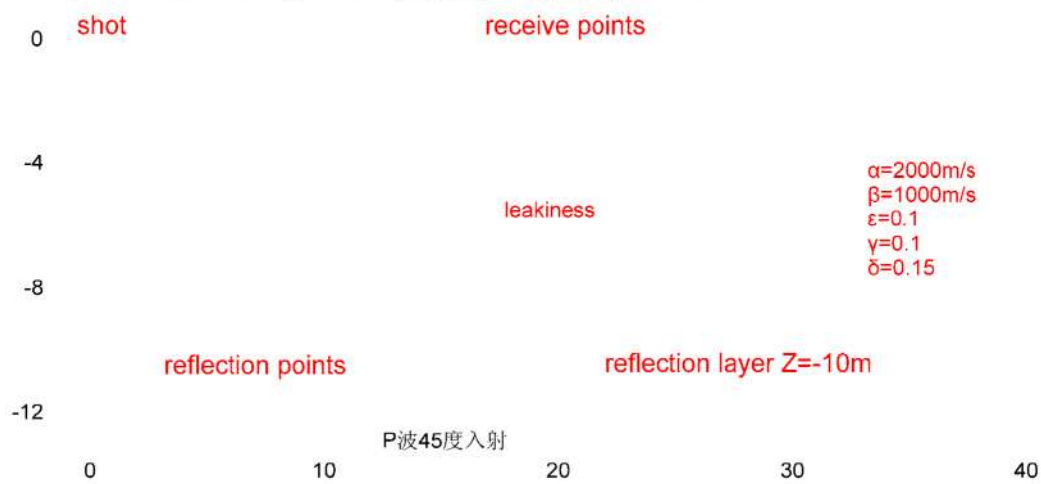


图 6.20 P 波 45°入射射线追踪图

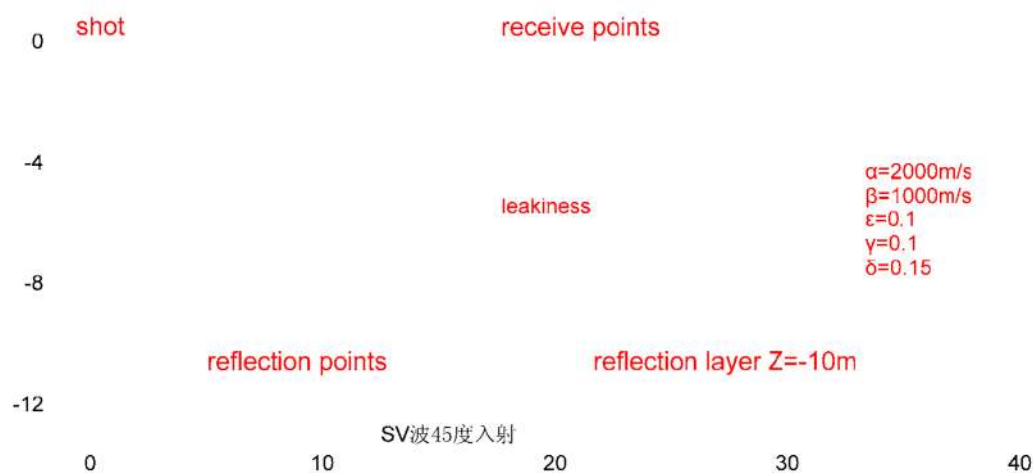


图 6.21 SV 波 45°入射射线追踪图

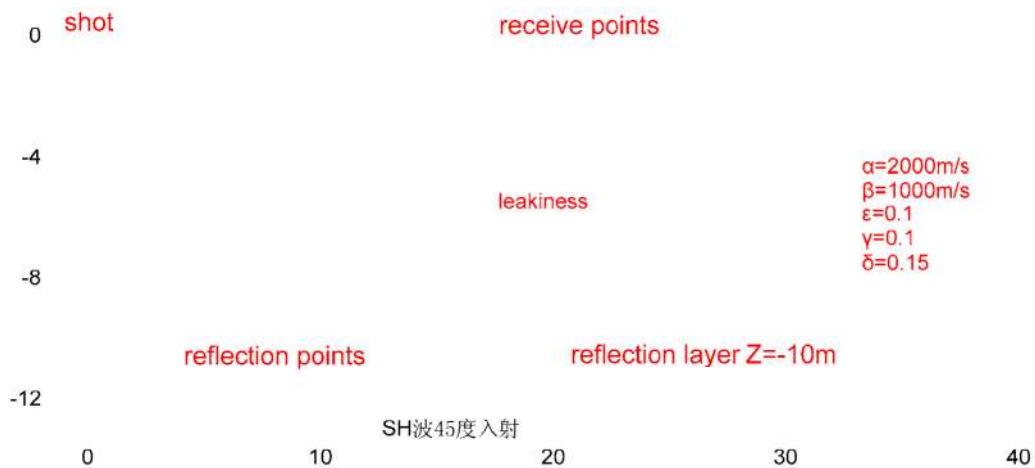


图 6.22 SH 波 45°入射射线追踪图

45°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.23。

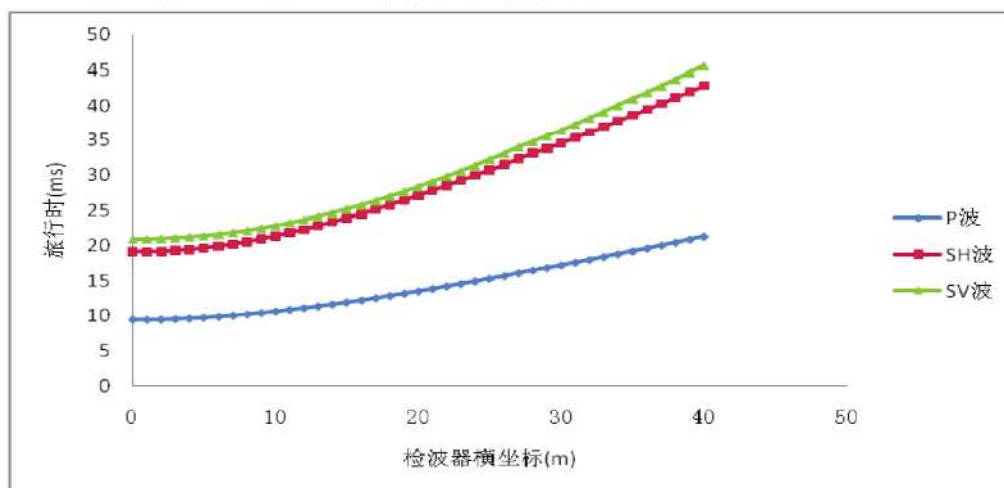


图 6.23 不同波形 45°入射走时差异图

(3) 90°入射下 P 波、SV 波、SH 波数值模拟

90°入射 P 波、SV 波、SH 波射线追踪图如图 6.24-6.26。

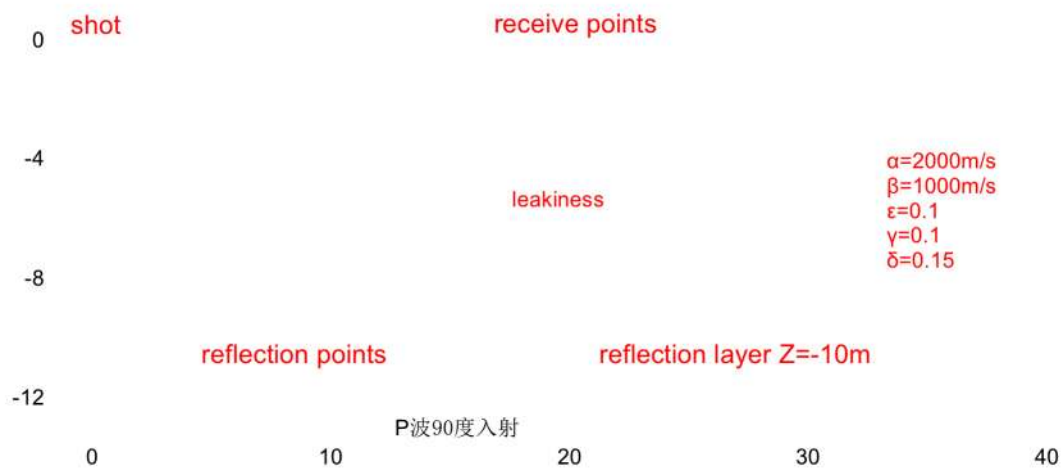


图 6.24 P 波 90°入射射线追踪图

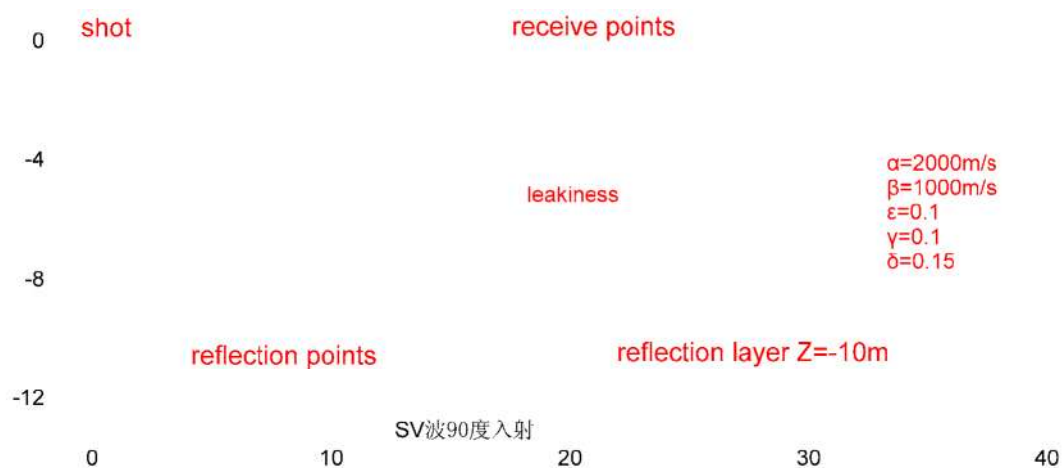


图 6.25 SV 波 90°入射射线追踪图

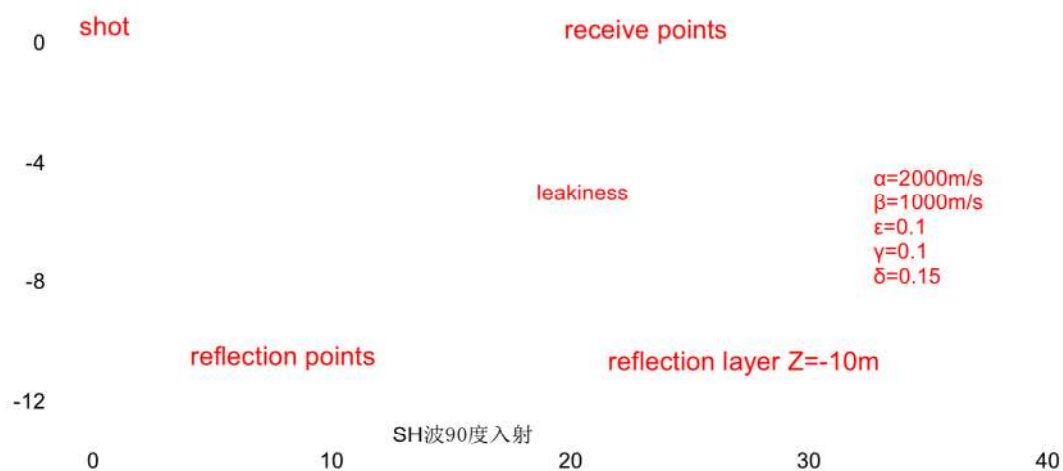


图 6.26 SH 波 90°入射射线追踪图

90°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.27。

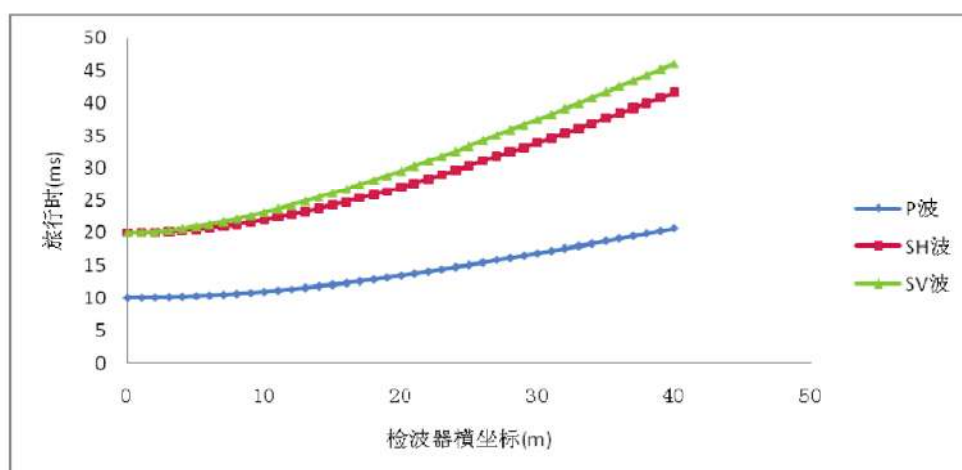


图 6.27 不同波形 90°入射走时差异图

(4) 同种波形不同入射角的走时差异如图 6.28-6.30。

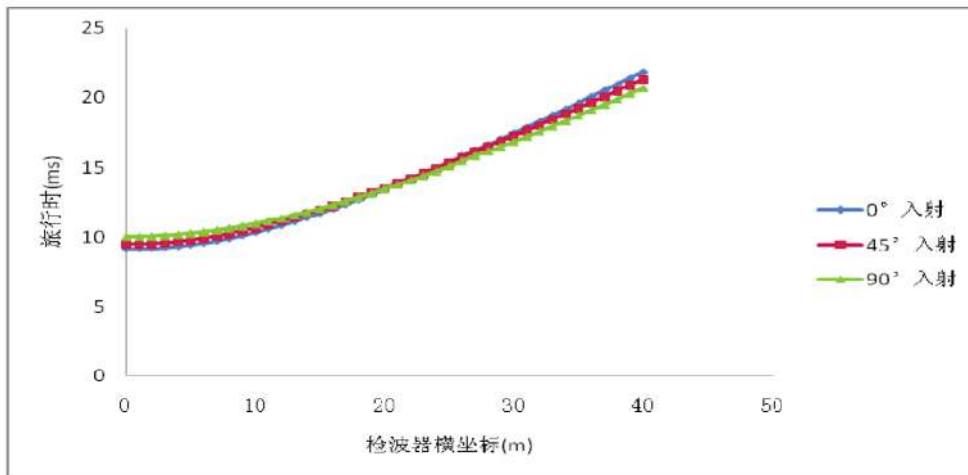


图 6.28 P 波不同入射角度走时差异图

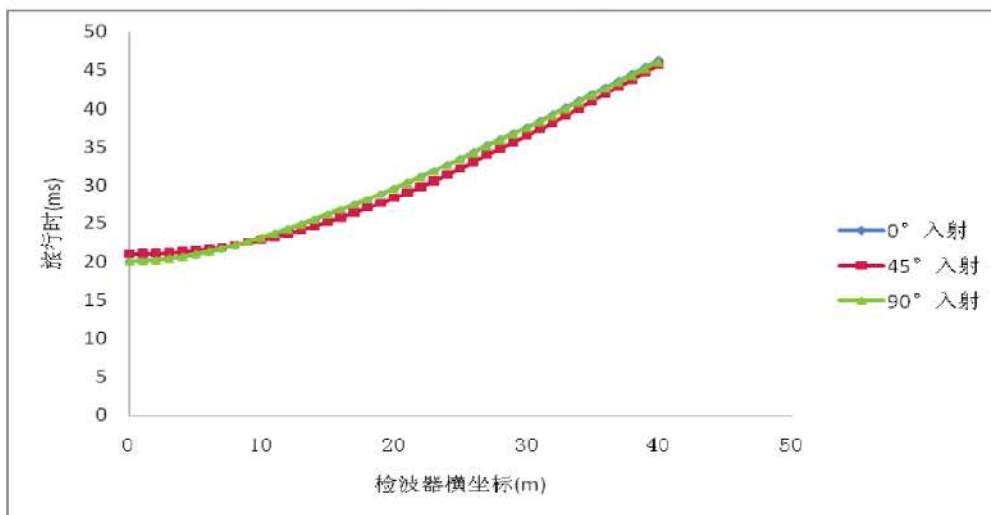


图 6.29 SV 波不同入射角度走时差异图

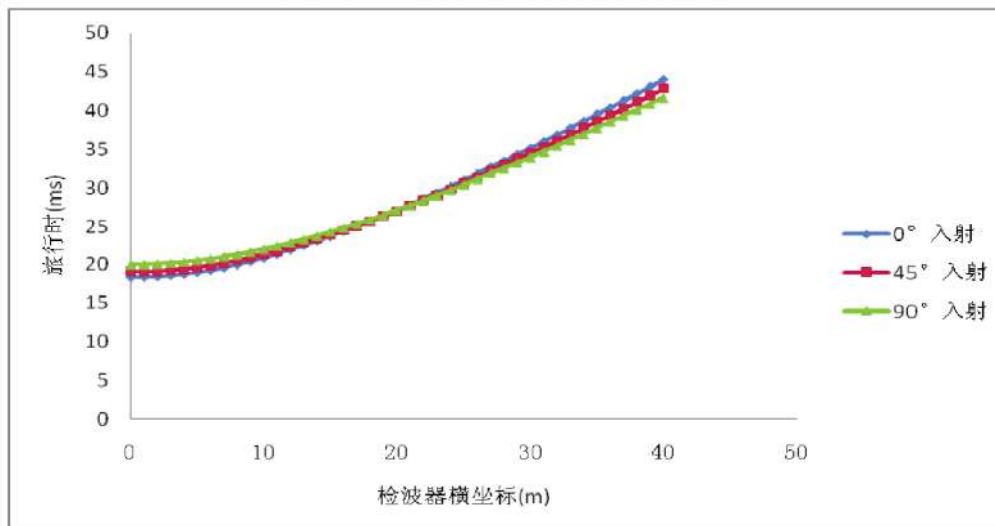


图 6.30 SH 波不同入射角度走时差异图

(5) 对比分析

通过对于图 6.16-6.18、图 6.20-6.22、图 6.24-6.26 三组对比图分析，可知不同的波形在相同的入射角度下射线路径是不一致的，在同一波形下不同的射线入射角度也会导致射线路径的不一致，每一组炮检点在反射界面上反射点也存在差异，可知在采用不同波形不同入射角度进行数值模拟会产生不同的效果。

通道对于图 6.19、图 6.23、图 6.27 三个图进行分析知不同入射角度的炮检点走时不一致，存在一定的差异，在 90° 入射时 SV 波与 SH 波波速在离炮点较近位置时速度一致，随着炮检距的扩大速度开始不一致，从这里可以看出横波分裂的现象，对于 0° 入射和 45° 入射时 SH 波与 SV 波在进入介质就已经分裂。

通过图 6.28-6.30 对比分析可知 P 波速度最快，SH 波其次，SV 波最慢，在同一种波形中三个入射角度走时存在交叉点，位置位于居中的检波器点。在离炮点较近的检波器处最先接收到的是 0° 入射来的波，随着距离的逐渐拉大， 0° 入射的路径变得更长，最先到达检波器的为 90° 入射的波，对于 SV 波而言， 0° 入射与 90° 入射其走时是一致的，没有区别，不同角度走时交叉点出现位置较其他波形更为接近炮点，位于 $1/4$ 的最大炮检距位置。

把含渗漏通道模型与含不密实区域模型进行对比分析，隐患尺寸的不同影响的只是射线路径，并没有对波形参数造成影响，此结果为更好的利用波速成像原理来对于堤坝介质的隐患检测提供了更有利的证据。

6.2 心墙坝

心墙坝的立面与均质坝相似，对于心墙坝的隐患检测主要是针对心墙进行的，在实际工程中心墙一般是由粘土或者混凝土堆筑而成，由于其材料及工程要求可知可以把心墙材料假定为各向同性介质。

6.2.1 含渗漏通道心墙坝

立面尺寸为 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，渗漏通道位于 $(20, -5)$ 点附近，炮点坐标位于 $(0,0)$ 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、、、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m ，其弹性参数取值见表 6-3。

表 6-3 介质的 Thomsen 参数取值

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ε	γ	δ
坝体	3000	1500	0	0	0
渗漏通道	500	250	0	0	0

由于各向同性介质下不同的入射角度对于射线路径及走时没有任何影响，故

本节只采用 0° 入射来进行射线追踪。

(1) 0° 入射不同波形射线追踪图如图 6.31-6.33。

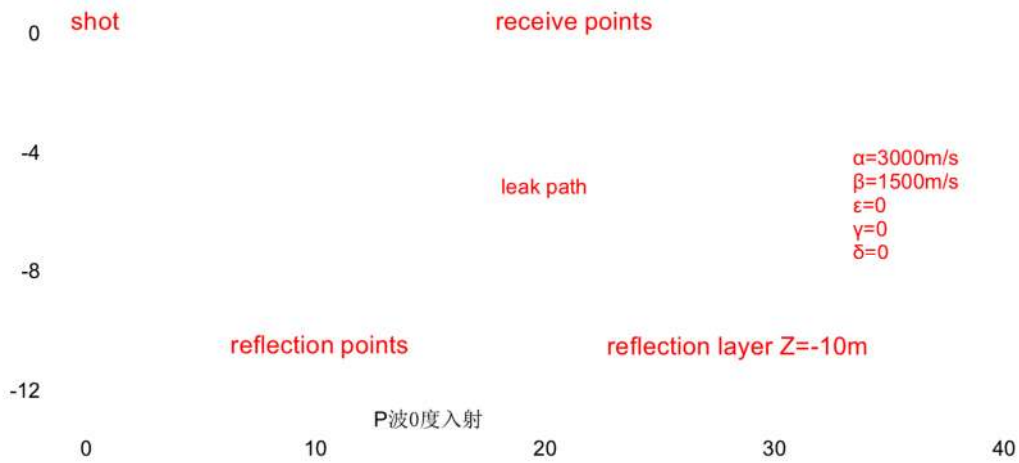


图 6.31 P 波 0° 入射射线追踪图

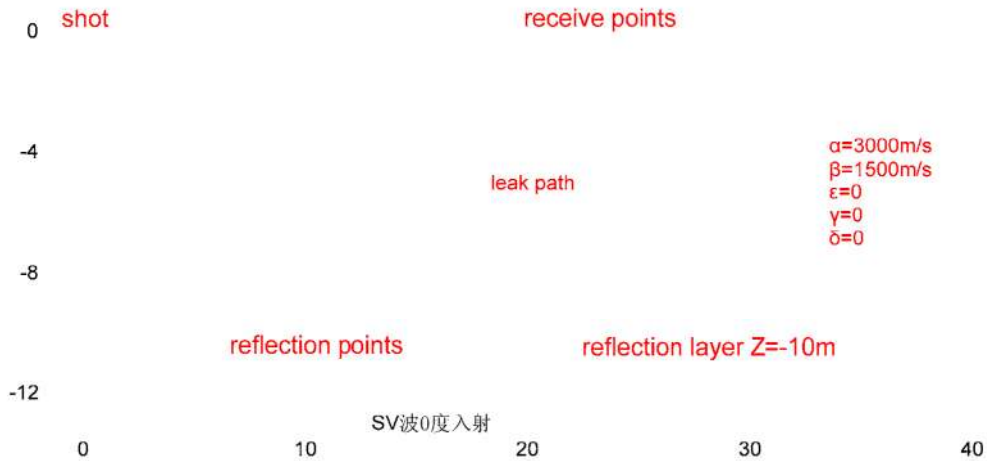


图 6.32 SV 波 0° 入射射线追踪图



图 6.33 SH 波 0° 入射射线追踪图

(2) 0° 入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.34。

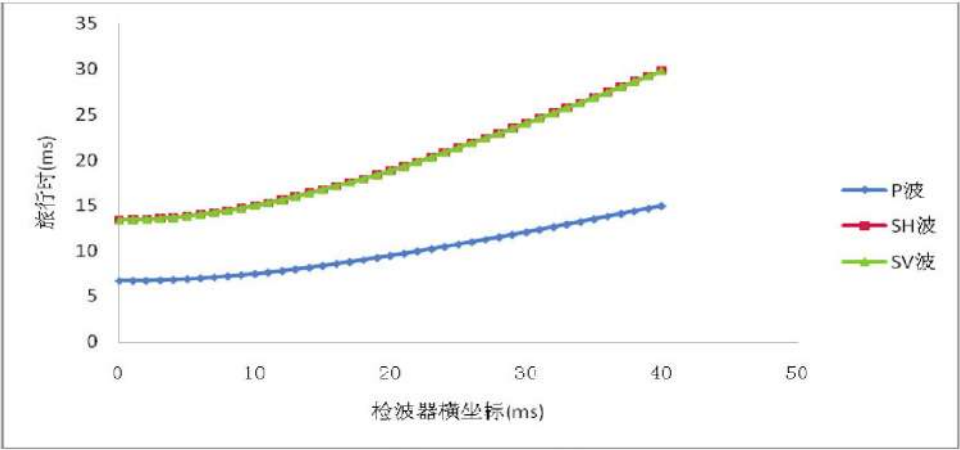


图 6.34 不同波形 0°走时差异图

(3) 对比分析

通过含渗漏通道不同波形射线路径追踪图可知不同的波形走时路径存在着一定的差异，反射界面上的反射点也不完全一致，由不同波形走时差异图中 SH 波与 SV 波走时线重合可知在各向同性介质中不存在横波分裂的现象，此时 SH 波与 SV 波其实就是一种波形，在各向同性介质中入射角的不同也不会对路径产生影响。这与实际现象还是存在着一定的差距，故采用各向异性模型能够更好的对于堤坝介质进行隐患检测。

6.2.2 含不密实区域心墙坝

立面尺寸为 40m×10m，不密实区域位于 (19, -5)、(20, -5)、(19, -6)、(20, -6) 四个节点所围成区域内部及边缘，炮点坐标位于 (0,0) 处，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 (0,0)、(1,0)、...、(40,0) 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 Z=-10m 处，计算时考虑坝基向下 2m，其弹性参数取值见表 6-4。

表 6-4 介质 Thomsen 参数取值表

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ε	γ	δ
坝体	3000	1500	0	0	0
不密实区域	500	250	0	0	0

各向同性介质下入射角度对射线追踪没有影响，选取 0°作为入射角进行数值模拟。

(1) 0°入射不同波形射线追踪图如图 6.35-6.37。

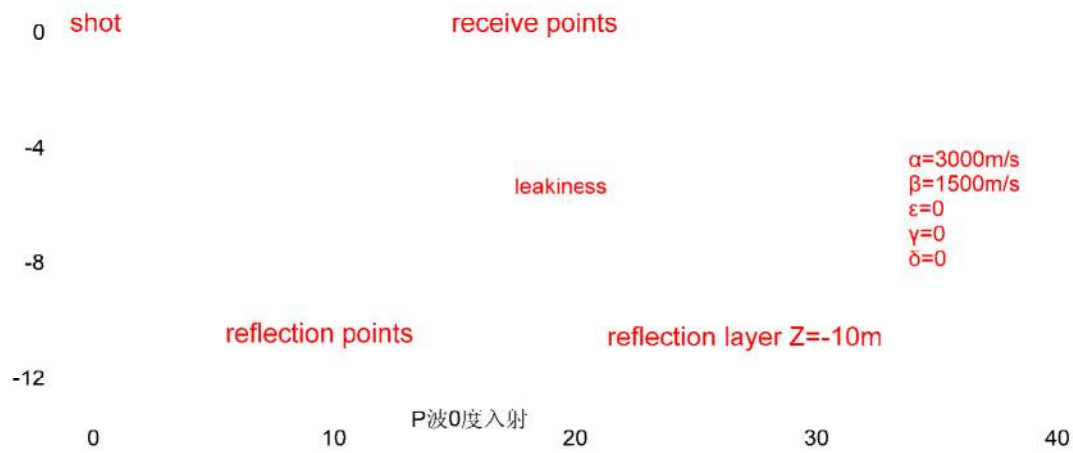


图 6.35 P 波 0°入射射线追踪图

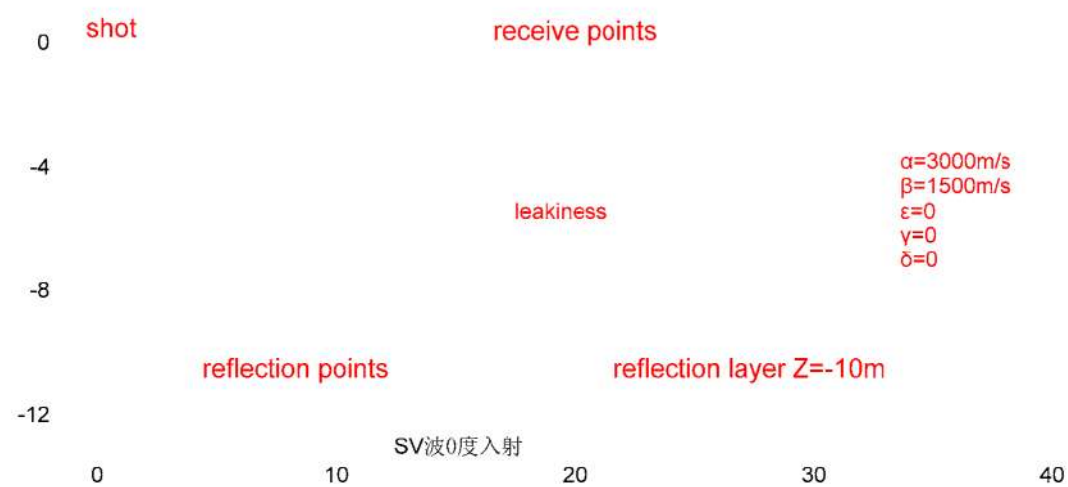


图 6.36 SV 波 0°入射射线追踪图

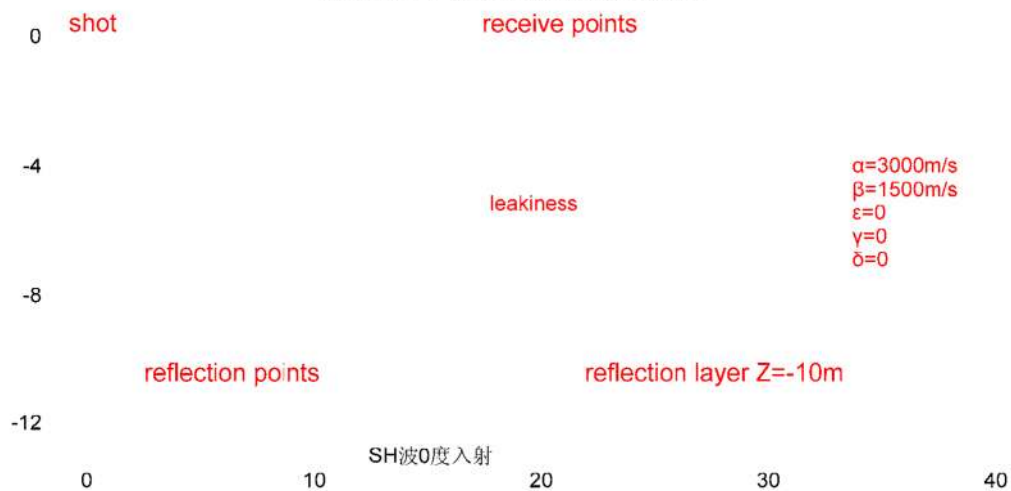


图 6.37 SH 波 0°入射射线追踪图

(2) 0°入射 P 波、SV 波、SH 波走时差异如图 6.38。

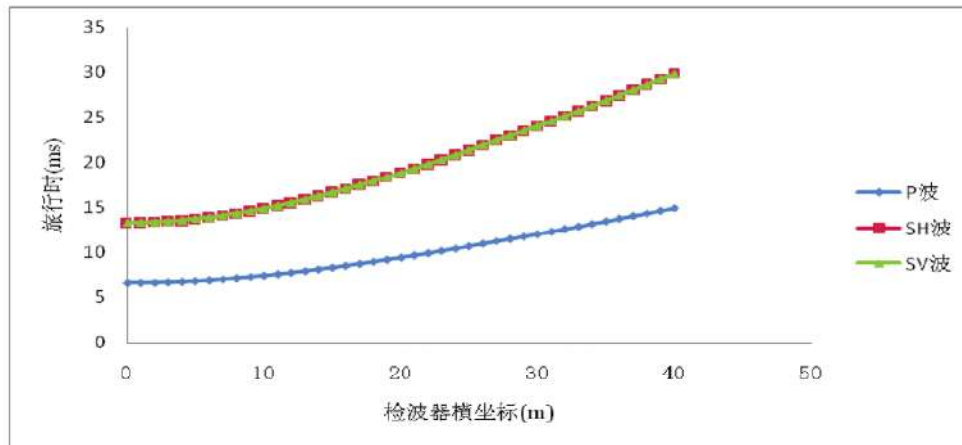


图 6.38 不同波形 0°入射走时差异图

(3) 对比分析

由含不密实区域心墙坝与含渗漏通道心墙坝模型对比分析知隐患的尺寸只对射线路径和走时有影响，对于波形没有影响，故波形的选择没有区别，在各向同性介质下采用 P 波是最好的选择，在最短路径射线追踪算法中波速与走时是隐患检测的关键，故采用此方法能够很好的对于堤坝隐患进行检测。

6.3 TI 介质与各向同性介质走时差异分析

各向同性介质中只存在 P 波和 SV 波，故对比分析只取 P 波和 SV 波两种波形，坝型则采用均质坝，使用不含隐患模型

模型尺寸与本章均质坝所采用尺寸一致，为 40 m×10m，炮点位于 (0,0) 处，检波器点间隔 1m 布设于表面，共有 40 个检波器点，其坐标分别为 (1,0)、(2,0)、…、(39,0)、(40,0)。

介质参数的选取见表 6-5，选取两组各向异性参数及一组各向同性参数来进行分析。

表 6-5 介质 Thomsen 参数取值表

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ϵ	γ	δ
各向同性介质	2000	1000	0	0	0
TI 介质 1	2000	1000	0.2	0.1	0.3
TI 介质 2	2000	1000	-0.2	-0.1	-0.3

6.3.1 P 波下的不同介质走时差异

介质的各向异性参数主要由弹性方程中的弹性参数表示，而 Thomsen 通过研

究提出了五个 Thomsen 参数来代替较难获得的弹性参数。不同介质类型下的参数不一致,此时走时也存在差异,P 波下的不同介质走时差异图如图 6.39。

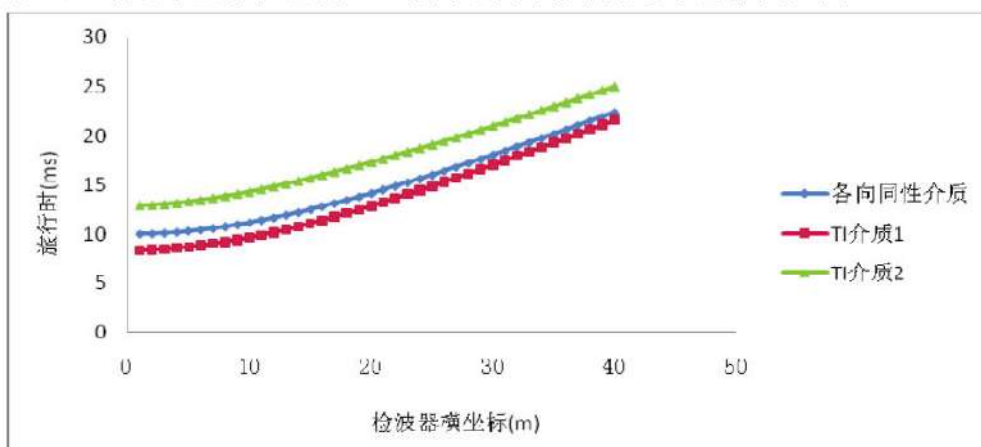


图 6.39 P 波不同介质走时差异图

6.3.2 SV 波下的不同介质走时差异

SV 波下的不同走时差异如图 6.40。

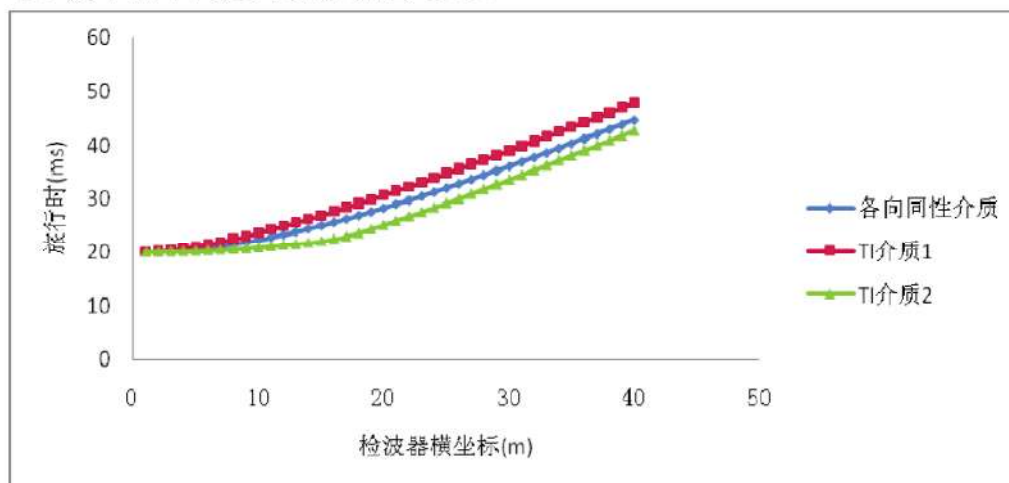


图 6.40 SV 波不同介质走时差异图

6.3.3 两种波形走时差异分析

通过对于图 6.39 进行分析得到不同的 Thomsen 参数的取值影响着介质内部的波速,在各向同性介质条件下的波速传播并不是最快,因为在横观各向同性条件下波速会随着地层的加深而发生变化, ϵ 是表示 P 波的各向异性参数,其越大说明各向异性越强,而 δ 是表示 P、S 波在垂直方向的各向异性的变化的快慢程度,当 δ 为正值时说明介质速度随深度增大,故体现在图 6.39 可看到 TI 介质 1 到达检波器的时间最短,当 δ 为负值时说明介质速度随深度减小,体现在图 6.39 上可知 TI 介质 2 到达检波器的时间最长,而各向同性介质没有速度变化,到达检波器的时间居于二者之间。

图 6.40 是介质中 SV 波的传播， γ 是表示横波分裂强度或者横波各向异性强度的参数， γ 越大，表示介质中的横波各向异性强度越强，则当 $\gamma=0$ 时，表明介质中的横波没有各向异性，通过图可知在入射瞬间三种介质的 SV 波速度是一致的，随着各向异性的不同，速度发生变化，与 P 波不同的是，此时 TI 介质 1 到达检波器的时间最长，TI 介质 2 到达检波器的时间最短，说明介质中 P 波、SV 波的速度并不一致。可知对于各向异性参数的研究有助于对于堤坝隐患检测的研究。

6.4 多发多收数值模拟

本节只针对均质坝含渗漏隐患的立面进行多发多收的数值模拟，模型尺寸与本文前述一直，均采用 $40\text{m} \times 10\text{m}$ ，渗漏通道位于 $(20, -5)$ 点附近，炮点坐标位于 $(0,0)$ 、 $(5,0)$ 、 $(10,0)$ 、 $(15,0)$ 、 $(20,0)$ 、 $(25,0)$ 、 $(30,0)$ 、 $(35,0)$ 、 $(40,0)$ 处，共 9 个炮点，检波器点坐标位于坡顶表面，间隔 1m 布置，如 $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 、...、 $(40,0)$ 等，共有 41 个检波器点，反射界面位于坝体与坝基接触面 $Z=-10\text{m}$ 处，计算时考虑坝基向下 2m。采用 P 波分 0° 、 45° 、 90° 三个角度入射，介质的 Thomsen 参数选取见表 6-6。

表 6-6 介质 Thomsen 参数取值表

Thomsen 参数 介质	α_0	β_0	ϵ	γ	δ
坝体	2000	1000	0. 1	0. 1	0. 15
渗漏通道	500	250	0	0	0

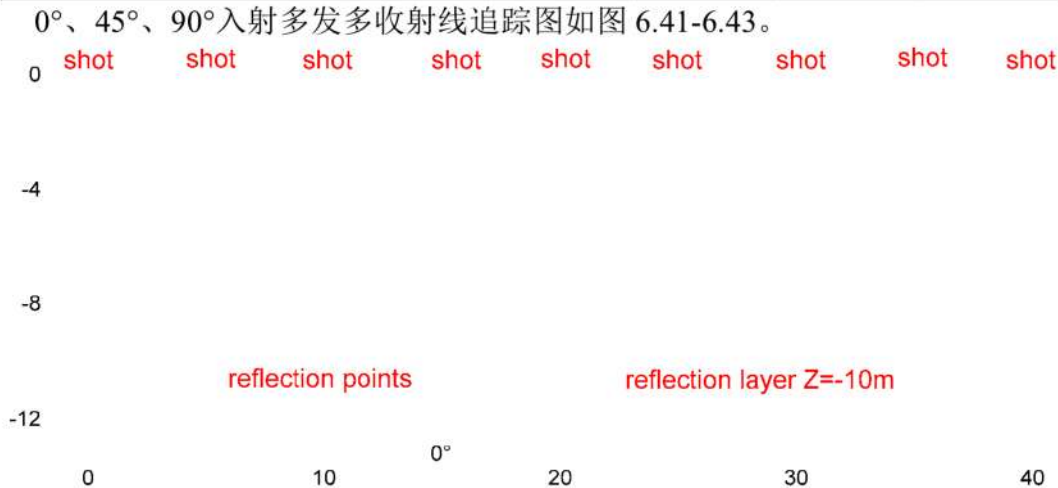


图 6.41 0° 入射多发多收射线追踪图

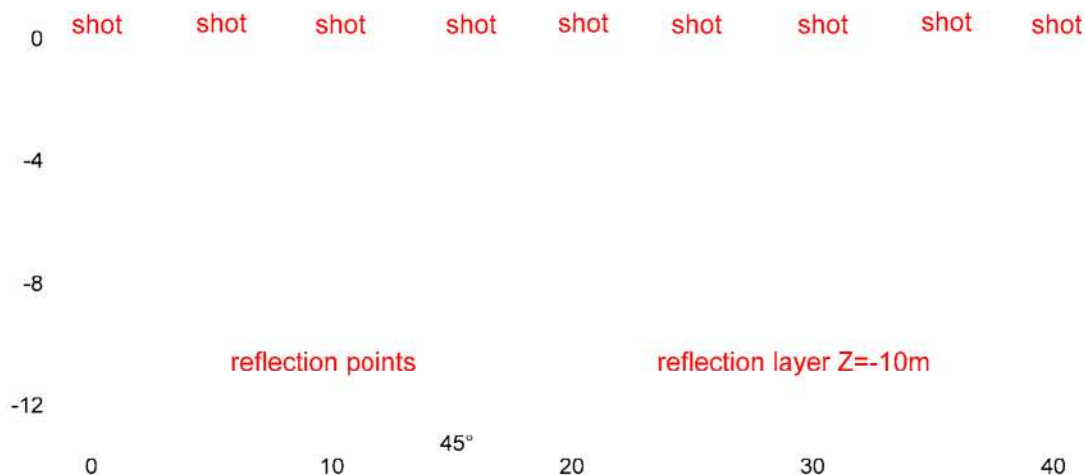


图 6.42 45°入射多发多收射线追踪图

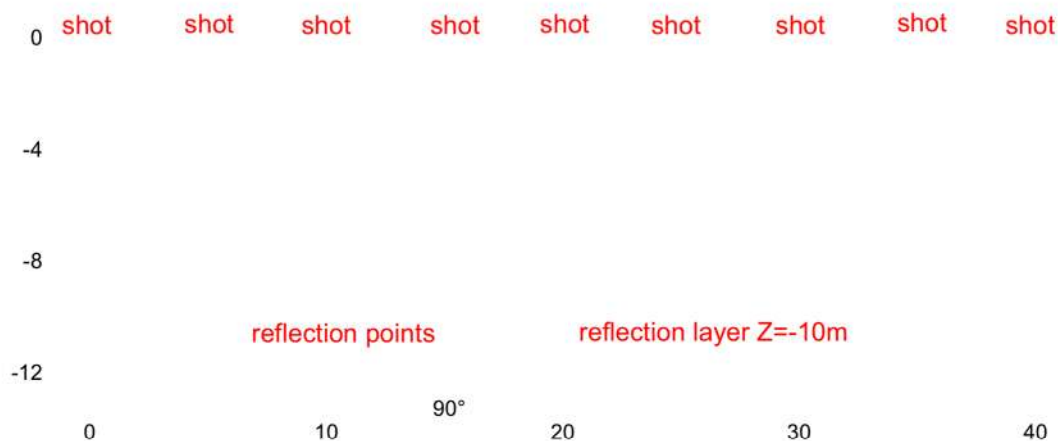


图 6.43 90°入射多发多收射线追踪图

6.5 本章小结

本章主要对于 TI 介质的反射波正演进行了数值模拟研究，分别采用不同波形（P 波、SV 波、SH 波）不同入射角度（0°、45°、90°）对于均质坝和心墙坝的两种隐患（含渗漏通道、含不密实区域）进行了数值模拟。对于 TI 介质与各向同性介质的走时进行了对比分析，对于 TI 介质模型进行了多发多收数值模拟。通过分析发现：

（1）不同的波形在相同的入射角度下射线路径是不一致的，在同一波形下不同的射线入射角度也会导致射线路径的不一致，每一组炮检点在反射界面上反射点存在着差异，采用不同波形不同入射角度进行数值模拟会产生不同的效果。

（2）在同一介质中 P 波的速度最快，SH 波其次，SV 波走时最长，隐患尺寸的大小只影响射线追踪的路径和走时，而反演成像的关键正好是路径和走时，故采用射线追踪方法能够比较理想的反演堤坝内部的隐患结构。

（3）各向异性参数的差异影响着介质内部的波动传播，P、S 波的传播受到各

向异性强度的影响，变异系数的大小则决定着 **P**、**S** 波在垂直方向的变化快慢程度，**S** 波在各向异性介质中存在横波分裂的现象。

第七章 结论与建议

7.1 研究成果及相关结论

本文本着拓展探测手段与方法的思路，依托于国家自然科学基金面上项目(51279219)“基于三维波电场耦合全息成像的堤坝隐患诊断技术研究”，围绕最短路径射线追踪正演技术手段，从各向同性介质及横观各向同性介质两个与堤坝内部结构相符的方面来对于其隐患进行了一定的研究。建立了各向同性正反演数值模型，并提出了反射波成像技术。对于横观各向同性介质进行了正演模型，研究了其在堤坝内部的相关波场特性。

(1) 在总结和分析堤坝类型的基础上，对其内部隐患进行了相应的分类和成因分析，结合工程实际情况，分别从均质坝和心墙坝两种坝型给出了堤坝隐患的概化模型。

(2) 通过研究正演最短路径的射线追踪方法，结果表明：最短路径算法灵活稳定，在对其进行改进（主节点内部插入次级节点）后计算精度得到了提升，结合了最短路径的射线追踪技术具有计算速度快、分辨率高、收敛稳定等特点；Thomsen 参数有助于更好的对于横观各向同性介质的弹性本构方程进行分析，可以更加便捷的对于弹性系数进行表征及计算。

(3) 最小二乘正交分解法作为求解稀疏矩阵方程组的算法具有占用内存小，运算速度快的特点，能够有效的压制误差的传递，具有较快的收敛性。

(4) 非线性反演方法中的全局算法具有可以在整个模型空间搜索，不会陷入局部极值，不依赖于初始值，在一定的限定条件下寻求到全局最优解的优点。局部算法具体收敛速度快、算法简单等优点。

(5) 通过对均质坝和心墙坝两种坝型进行数值模拟分析，结果表明：同种坝型的不同隐患的反演效果有一定差异，其原因在于射线进行追踪时网格的划分；同种隐患不同坝型的反演效果也存在差异，因其内部结构影响着射线的路径。

(6) 通过对初始模型正演及反演结束后模型的走时误差对比分析，表明射线在经过无隐患处的误差很小，而在经过有隐患的位置时误差较大，说明速度的大小差异影响着射线的路径。

(7) 不同的波形在相同的入射角度下射线路径是不一致的，在同一波形下不同的射线入射角度也会导致射线路径的不一致，每一组炮检点在反射界面上反射点也存在差异，采用不同波形不同入射角度进行数值模拟会产生不同的效果。

(8) 在同一介质中 P 波的速度最快，SH 波其次，SV 波走时最长，隐患尺寸

的大小只影响射线追踪的路径和走时，而反演成像的关键正是路径和走时，故采用射线追踪方法能够比较理想的反演堤坝内部的隐患结构。

(9) 各向异性参数的差异影响着介质内部的波动传播，P、S 波的传播受到各向异性强度的影响，变异系数的大小则决定着 P、S 波在垂直方向的变化快慢程度，S 波在各向异性介质中存在横波分裂的现象。

7.2 本文的创新点

(1) 利用波速成像原理，通过利用反射波速成像技术应用到各向同性介质的堤坝隐患诊断中，拓展了堤坝隐患诊断的技术，为以后诊断技术的研究提供了更多的选择；

(2) 研究了各向异性介质中与堤坝内部结构相似的横观各向同性介质的波速成像原理，利用反射波对于横观各向同性介质进行了正演成像分析。

7.3 下一步工作建议

弹性波与其他媒介相比具有力学行为单一、安全性较高、无损、不受电磁干扰等特性，因此在堤坝隐患诊断技术中利用弹性波速成像技术具有非常广阔的前景，但是由于理论相关性的不足及试验仪器的分辨率及灵敏度不高等问题，这项技术要真正的应用到实际工程中还有很长的路要走，为了更好更快的将波速成像技术服务于国家，需要在理论及应用等方面进行相关的改进。

本文将反射波成像初步运用到基于横观各向同性介质的堤坝隐患诊断技术中，仅仅是对于正演进行了相关的分析，而各向异性介质波速成像所涉及的参数较多，故反演还是有一定难度，在以后的工作中需要对于反演成像进行更加深入的研究，开发出基于反射波成像的横观各向同性介质的堤坝隐患诊断技术。

致 谢

本文是在导师赵明阶教授的热情关怀和悉心指导下完成的。从论文的选题到具体的实施到最终的成稿，无一不饱含着赵老师对于学生的呵护与关心，赵老师身上所体现的严谨的学风、丰富的实践经验、广博扎实的理论知使本人在求学的三年中受益匪浅。三年来赵老师对我学业上的指导和教诲、生活上的关心和帮助，我将一直铭刻在心。赵老师工作中展现出的严谨细致、一丝不苟的作风始终是我学习的目标。在赵老师的悉心培养下，我的理论水平、科研能力、工程应用能力都得以明显的提高，相信在以后的工作中这些都会是我前进的动力。同时他忘我的工作精神，严谨的工作态度，开拓创新的精神，实事求是的作风，也为我在以后的工作中树立了榜样。值此论文完成之际，谨向尊敬的赵老师表示衷心的感谢和深深的敬意。

特别感谢林军志副教授和汪魁博士在生活和学习中对于我的帮助和鼓励，是你们让我感受到了师门的热情氛围，在你们的带领下师门展现出蓬勃的生机，每一个身在其中的人都能够充分享受着求学之旅的愉悦与舒畅！

特别感谢强跃、孙笑等师兄、师姐对于我的指导和照顾，是你们用自己的经验教会我如何成长，使得我在经历坎坷时能够快速的站立，希望你们博士之路早日凯旋！

特别感谢师门的广大师兄姐妹们，是你们让我感觉到师门这个充满爱意和激情的大家庭，让我在外求学时还能够感觉到家一般的温暖，希望这种传统能够一直延续下去，也希望我们的师门能够日俞壮大，不管毕业后的我身在何方，都能够听到来自师门的声音，我的心与你们同在！

感觉我的室友，是你们在生活和学习中与我并肩作战，我们一路经历着这三年来的酸甜苦辣，一起迈向人生的征途。

借此机会，向一直默默关心和支持我的家人致以深深的敬意，是你们的支持造就了今天的我。

最后，衷心感谢在百忙之中参加评阅论文和答辩的各位专家、教授！

参考文献

- [1] 薛永军,武秀芳.浅层地震反射波法在煤矿采空区勘查中的应用[J].华北国土资源,2007 年第 02 期.
- [2] 王运生,苏建黎.浅层地震联合成像技术及其应用研究[J].工程地球物理学报,2007,4(4):306-311.
- [3] Zhao D and Kayal J R. Impact of seismic tomography on Earth sciences [J]. Current Sciences, 2000, 79:1208-1214.
- [4] Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes[J]. Earth Planet. Sci. Lett.2001,192:251-265.
- [5] Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs :insight into deep Earth dynamics[J]. Phys. Earth Planet. Inter.2004,146:3-34.
- [6] Zhao D, To do S and Lei J. Local earthquake reflection tomography of the landers aftershock area [J].Earth Planet. Sci. Letat, 2005, 235:623-631.
- [7] Aki K, Lee W H K. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes [J]. Geophys Res, 1976,81(23):4381~4399.
- [8] 周小仙.利用地震反射和折射联合层析成像探测深部构造方法研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国地质大学,2010.
- [9] Williamson P. R. Tomographic inversion in reflection seismology[J]. Geophys.J .Int. 1990,100:255-274.
- [10] Cerveny .Psencik I. Gaussian beams and paraxial ray approximation in three dimensional elastic inhomogeneous medua[J]. J. Geophys., 1983,53:1-15.
- [11] Julian B.R. Gubbins D. Three-dimensional seismic ray tracing[J]. J.Geophys. 1977,43:95-113.
- [12] Um J., Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987,77:972-986.
- [13] Vidale J. E. Finite-difference calculation of travel times[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1988,78:2602-2617.
- [14] Moser T. J. Shortest path calculation of seismic rays[J]. Geophysics,1991, 56:59-67.
- [15] Asawaka E. and Kawanaka T. Seismic ray tracing using linear travelttime interpolation[J]. Geophysics Prospecting,1993,41,99-111.
- [16] Nakanishi L. Yamaguchi K. A numerical experiment on nonlinear image reconstruction from first-arrival time for two-dimensional island are structure [J]. Journal of physics of the Earth,

1986, 34:195-201.

- [17] 刘洪,孟凡林,李幼铭. 计算最小旅行时和射线路径的界面网全局方法[J]. 地球物理学报,1995,38(6):823-832.
- [18] 赵爱华,张中杰,王光杰等. 非均匀介质中地震波旅行时与射线路径快速计算技术[J]. 地震学报,2000,22(2):151-15.
- [19] 赵爱华,张中杰. 三维复杂介质中转换波旅行时快速计算[J]. 地球物理学报,2004,47(4):702-707.
- [20] 赵爱华,丁志峰. 宽角反射地震波旅行时模拟的双重网格法[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1141-1147.
- [21] 王童奎,张美根,李小凡等. PS 转换界面二次源法射线追踪[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):165-170.
- [22] 唐小平,白超英. 最短路径算法下三维层状介质中多次波追踪[J]. 地球物理学报,2009,52(10):2635-2643.
- [23] 赵瑞,白超英. 复杂层状模型中多次波快速追踪——一直基于非规则网格的最短路径算法[J]. 地震学报,2010,32(4):434-444.
- [24] 唐小平,白超英,刘宽厚. 分区多步最短路径极值算法多值多次反射波追踪[J]. 地球物理学进展,2011,26(6):2064-2074.
- [25] 李强,白超英. 复杂介质中地震波前及射线追踪综述[J]. 地球物理学进展,2012,27(2):0092-0104.
- [26] 罗炬,李志海,王海涛. 地震层析成像研究方法综述[J]. 内陆地震,2011,25(4):311~320.
- [27] 周竹生,谢金伟. 模拟退火法的弯曲射线追踪[J]. 物探与化探,2011,35(6):793-797.
- [28] 郑伯熊,桑永胜. 求解最短路径问题的 Lotka-Volterra 回复式神经网络模型[J]. 计算机应用,2012,32(7) 1965-1968.
- [29] 王家映. 地球物理反演理论:第二版[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [30] 徐果明. 反演理论及其应用[M]. 北京:地震出版社,2003.
- [31] 张岭,刘劲松. 从 AGU2004 秋季年会看地震层析[J]. 地球物理学进展,2005, 20(3):600-610.
- [32] 张元生,李清河. 联合利用走时与波形反演技术研究地壳三维速度结构(I)——理论与方法[J]. 西北地震学报,1998,20(2):8-15.
- [33] 赵火焱,赵明阶,黄卫东等. 基于最小走时射线的 LSQR 成像反演方法研究. 重庆交通大学学报. 2009,2(2):315~318.
- [34] 赵明阶,余东,赵火炎,土石坝渗漏的波速-电阻率联合成像诊断试验研究,水利学报,2012,43 (1),pp118-126.

- [35] 裴正林,余钦范.小波多尺度井间地震波形遗传进化层析成像方法[J].石油地球物理学报,2002, 37(3):238-240.
- [36] Christoffel E. B.. Über die fortpflanzung von stößen durch elastische feste körper[J]. Annali dimatematica, 1877,8:193-243.
- [37] Krey T. H., Helbig K.. A theorem concerning anisotropy of stratified media and its significance for reflection seismic[J]. Geophys. Prosp., 1956,4:294-302.
- [38] Hess H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans[J]. Nature,1964,204:629-631
- [39] Hudson J. A. A higher order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid[J]. Geophysical journal of the royal astronomical society. 1981,64:133-150.
- [40] Crampin S.. Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solid[J]. Geophysical Journal of the royal astronomical society. 1984,76:135-145.
- [41] Thomsen L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986,51(10):135-145.
- [42] 滕吉文,张中杰,杨顶辉等. 各向异性介质中褶积微积分算子法三分量地震资料的数字仿真[J]. 石油物探, 1995,34(3):14-22.
- [43] 滕吉文,王光杰,杨顶辉等. 地球各向异性介质中地震波动理论、检测与应用研究[J]. 地学前缘,1988,5(12):83-90.
- [44] 张中杰,何樵登.含裂隙介质中地震运动学问题正演模拟[J]. 石油地球物理勘探,1989,24(3):290-300.
- [45] 张中杰,滕吉文,万志超. 二维各向异性介质中地震波前参数方程的建立[J]. 科学通报, 1994,39(15):1399-1402.
- [46] 张中杰, 滕吉文. 各向异性介质中界面上改进型斯奈尔定律[J].科学通报,1995, 90(2): 1724-1728.
- [47] 张秉铭.各向异性介质中弹性波数值模拟与偏移研究[D]:[硕士学位论文].北京:中国科学院地球物理研究所,1997.
- [48] 邓怀群,刘雯林,赵正茂. 横向各向同性介质中纵波和转换横波的快速射线追踪方法[J]. 石油物探,2000,39(4):1-11.
- [49] 姚陈,郝重涛,王迅.任意空间取向 TI 介质三类体波速度和偏振解析解[[J].CPS/SEG 2004 国际地球物理会议论文集,2004: 591-594.
- [50] 姚陈.任意空间取向 TI 介质三维倾斜界面 P 波 NMO 速度[[J].中国地球物理学会年刊,2004. 430-493.
- [51] 蒋先勇,王锡文,秦广胜等. 深层地震速度分析的不确定性研究[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(1):35-41.

- [52] 赵爱华,张美根,丁志峰.横向各向同性介质中地震波走时模拟[J].地球物理学报,2006,49(6): 1762-1769.
- [53] 张铁强.地震属性及其对实际数据的应用[D]:[硕士学位论文].北京:中国地质大学,2010.
- [54] 李建国,李彦鹏,郭晓玲.VTI 介质试射射线追踪[J].石油物探,2010, 45.
- [55] 白海军,孙赞东,王学军. 基于波前构建法的 TTI 介质射线追踪,2011,46(1):1-6.
- [56] 李勤. VTI 介质多波射线追踪及各向异性参数分析[D]:[博士学位论文]. 西安:长安大学, 2011.
- [57] 李永博. VTI 介质及复杂模型 FMM 射线追踪方法研究[D]:[硕士学位论文]. 西安:长安大学,2012.
- [58] 张永刚.地震波场数值模拟方法[J].石油物探,2003, 42(2): 143-147.
- [59] 张钊,刘洪,李幼铭.射线追踪方法的发展现状[J].地球物理学进展,2000, 15(1):36-45.
- [60] 孟庆生,何樵登,王德利.均匀横向各向同性介质中 P 波及 SV 波的射线规律[J].吉林大学学报(地球科学版).2002, 32(4): 378-382.
- [61] 张建中.三维 TI 介质中 P 波 NMO 速度及 VSP 走时联合反演[[D]:[博士学位论文].北京:中国地震局地质研究所,2005.
- [62] 唐巍,李磊.多层垂直对称轴横向各向同性介质精确走时计算[J].地震学报,2008,30(4):367-376.
- [63] 孙福利,杨长春,陈雨红,等.弱各向异性介质中 qP 波的一阶射线追踪[J].地球物理学进展,2009, 24(1): 35-41
- [64] 郝奇. VTI 介质速度和各向异性参数建模研究[D]:[博士学位论文].吉林:吉林大学,2010.
- [65] Blot M A.Theory of propagation of waves in fluid-saturated porous solid(I)[J].J.Acoust Soc Am,1956,28(2):168-178.
- [66] 中华人民共和国水利部.GB50286-2013 堤防工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [66] 中华人民共和国水利部.SL274-2001 碾压式土石坝设计规范[S].北京:中国电力出版社,2001.

攻读硕士学位期间发表论文及参与科研情况

一、攻读硕士学位期间发表论文情况

- 1、袁鹏，赵明阶，汪魁等.基于断裂理论的深埋围岩洞室水力劈裂机理研究[J].重庆交通大学学报,2013,32(6):1190-1194.
- 2、汪魁，曹媛，袁鹏.导流洞堵头力学效应及设计影响因素分析[J].水利水运工程学报,2013,6(5):71-76.

二、攻读硕士学位期间参与科研情况

- 1、基于三维波电场耦合全息成像的堤坝隐患诊断技术研究，国家自然科学基金面上项目(51279219)；主研，项目分工：程序的编制、数值模拟的实现；
- 2、重庆交通大学研究生创新基金：波浪荷载作用下土石混合体岸坡宏细观力学性状研究（2012106），主研，项目分工：试验数据的收集与整理。